

**Einsatzmöglichkeiten funkbasierter Datenübertragung in  
industriellen Kommunikationssystemen für Anwendungen mit  
Echtzeitanforderungen auf der Feldebene der  
Fertigungsautomatisierung**

Von der  
Carl-Friedrich-Gauß-Fakultät  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines

**Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation

von  
Matthias Bauer  
geboren am 19.11.1978  
in Bamberg

Eingereicht am: 15.10.2020

Disputation am: 31.05.2021

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Lars Wolf

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Kürner



# Kurzfassung

Mit einem laut statistischem Bundesamt erzielten Jahresumsatz von über 220 Milliarden Euro im Jahr 2019 bildet der Maschinenbau neuerlich das Rückgrat der deutschen Wirtschaft. Auch im internationalen Vergleich nimmt er als Schlüsselindustrie eine führende Marktposition ein, die nur durch kontinuierliche Innovation gehalten werden kann. In diesem Sinne ist der Einsatz von Funktechnik in industriellen Kommunikationssystemen in Teilbereichen der Automatisierungstechnik wie der Prozess- und Gebäudeautomatisierung bereits seit vielen Jahren eine fruchtbare Innovationsquelle.

Im Teilbereich der Fertigungsautomatisierung hingegen stellen echtzeitkritische Anwendungen auf der Feldebene mit Übertragungslatenzen im Bereich weniger Millisekunden derart hohe Anforderungen an ihre Kommunikationssysteme, dass die bislang gängige Praxis, off-the-shell Funkkomponenten – ggfs. leicht angepasst – zu nutzen, nicht mehr ohne weiteres trägt und neue Lösungsansätze erforderlich sind. Dem begegnet diese Arbeit mit dem Konzept eines hybriden industriellen Kommunikationssystems, das die konkreten Anforderungen echtzeitkritischer Anwendungen in den Blick nimmt und diese systematisch in die Auslegung eines ganzheitlichen Ansatzes für das industrielle Kommunikationssystem überführt.

Im Ergebnis wird dem Anwender eine Industrial-Ethernet-Brücke zur Verfügung gestellt, die funkbasierte und drahtgebundene Teilkomponenten integriert, die sich bei der Inbetriebnahme einer Maschine flexibel konfigurieren und nahtlos mit existierenden Altgeräten kombinieren lassen. Der nötige Freiheitsgrad resultiert aus der Analyse des Mobilitätsverhaltens von Maschinen bzw. Maschinenteilen. Dabei zeigt sich, dass sich typischerweise nur wenige Maschinenteile relativ zueinander bewegen, für die eine funkbasierte Anbindung einen echten Mehrwert bietet. Berücksichtigt man dies bei der Auslegung des Kommunikationssystems, profitiert zuvorderst der funkbasierte Medienzugriff, was am Fallbeispiel einer Rundtaktmaschine mit einer einzelnen Funkverbindung anhand eines Demonstratorsystems mit IEEE-802.11-basierten off-the-shelf Funkkomponenten nachgewiesen wird. Steigt die Anzahl der Funkverbindungen, so zeigt das Fallbeispiel einer Verpackungsmaschine anhand einer Simulationsstudie die Grenzen des off-the-shelf Ansatzes auf; proprietäre Erweiterungen hin zu einem deterministischen Medienzugriff heben diese Begrenzungen auf. In der Wirkweise des Medienzugriffs von LTE werden dabei de facto die idealtypischen Eigenschaften für echtzeitkritische Anwendungen identifiziert.

Hinsichtlich Standardisierung und Funkregulierung stehen mit 3GPP Release 16 und den privaten 5G-Campusnetzen technologisch potente Alternativen bereit, die explizit auch echtzeitkritische industrielle Anwendungen adressieren. Solange Maschinenbauer jedoch die organisatorischen Fragen um Frequenzvergaben und ihre Unabhängigkeit bei der Nutzung von privaten Campusnetzen nicht zufriedenstellend geklärt sehen, wird zur Wahrung der wirtschaftlichen Interessen weiterhin bevorzugt auf Lösungen in den frei verfügbaren ISM-Bändern gesetzt. Unabhängig von der Wahl einer konkreten Funktechnologie trägt weiterhin das Systemkonzept des

in dieser Arbeit entwickelten hybriden industriellen Kommunikationssystems.

# Danksagung

Gemessen am zeitlichen Rahmen, den die vorliegende Arbeit in ihrer Gänze einnahm, kann sich diese Danksagung nicht als groß genug erweisen – Ein Versuch sei dennoch gewagt. So möchte ich für den Beginn der Reise Petra Häfner danken, ohne deren wertvolle Meinung ich den Weg der Promotion nicht als den meinen Lebensweg erwogen hätte. Treffend besingt es *Roxie* im Broadway-Musical *Chicago*:

*“You can like the life you’re living  
You can live the life you like”*  
(Textzeilen aus dem Lied *Nowadays*)

Das praktische Fundament der Dissertation durfte ich in drei Jahren bei Bosch Rexroth in der Abteilung für elektrische Antriebsentwicklung in Lohr am Main erarbeiten. Hier gebührt mein herzlichster Dank meinem Betreuer, Ratgeber, Diskussionspartner und Antreiber Dr. Gunther May, ohne den ich bisweilen verzweifelt wäre. Bedanken möchte ich mich ebenso bei den wunderbaren Kollegen der Fachabteilung. Hervorzuheben sind deren turnusmäßig zelebrierte, soziale Aktivitäten, zu denen auch ich mich hinzugesellen durfte. Das Motto dieser Phase umschreibt der philosophierende Physiker wie folgt:

*“Wir irren uns empor”*  
(Gerhard Vollmer)

Mit Ablauf meiner befristeten Doktorandenstelle und dem Nichtfertigsein der Dissertation begann die schwierigste Phase der Promotionszeit. Hier gilt mein größter Dank meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Lars Wolf, der über die gesamte Dauer hinweg ein offenes Ohr hatte, mit Ratschlägen und Anregungen zur Seite stand und mir über die Zeit des Erstellens der schriftlichen Ausarbeitung treu geblieben ist. Ein sportlicher Gruß aus der emotionalen Auszeitenansprache des Basketballtrainers eines zurückliegenden Teams trifft es vorzüglich:

*„Always keep on grinding“*  
(Andrea Trinchieri, Coach der Brose Baskets Bamberg von 2014 – 2018)

Mit den ersten Lichtstrahlen am Ende des Tunnels war ein Momentum spürbar, ich konnte die schriftliche Ausarbeitung abschließen, und die Disputation rückte näher. Auf diesen letzten Metern standen mir wieder Prof. Dr.-Ing. Lars Wolf und Prof. Dr.-Ing. Thomas Kürner als Referenten zur Seite und geleiteten mich über den Zielstrich – ihnen gebührt mein Dank dafür. Idealistisch prägnant formuliert es Hegel:

*„Das Wahre ist das Ganze“*  
(Georg Wilhelm Friedrich Hegel, aus der *Phänomenologie des Geistes*)

Neben der fachlichen Unterstützung konnte die Arbeit nur im Lichte eines breiten und engmaschigen sozialen Netzes aus Familie und Freunden gelingen, das mir stets den Rücken frei hielt und mich zum Weitermachen motivierte. Danke, dass es euch gibt!



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation für die Arbeit . . . . .	2
1.2. Aufbau der Arbeit . . . . .	4
 <b>I. Bestandsaufnahme und Anforderungsanalyse</b>	 <b>7</b>
<b>2. Anforderungsanalyse</b>	<b>8</b>
2.1. Kategorisierung industrieller Anwendungen . . . . .	8
2.1.1. Branchen der Automatisierungstechnik . . . . .	8
2.1.1.1. Gebäudeautomatisierung . . . . .	9
2.1.1.2. Prozessautomatisierung . . . . .	9
2.1.1.3. Fertigungsautomatisierung . . . . .	10
2.1.2. Automatisierungspyramide . . . . .	11
2.1.2.1. Obere Hierarchieebenen . . . . .	11
2.1.2.2. Untere Hierarchieebenen . . . . .	11
2.2. Feldebene der Fertigungsautomatisierung . . . . .	12
2.2.1. Komponenten und Technologien . . . . .	12
2.2.1.1. Komponenten . . . . .	13
2.2.1.2. Technologien . . . . .	13
2.2.2. Anwendungen und deren Abstraktion . . . . .	14
2.2.2.1. Geräte und deren Beschreibung . . . . .	14
2.2.2.2. Funktionsspezifische Abstraktion . . . . .	14
2.3. Anforderungen an industrielle Kommunikationssysteme . . . . .	16
2.3.1. Kenngrößen und Dienstgüte . . . . .	17
2.3.1.1. Knotenzahl . . . . .	17
2.3.1.2. Reaktionszeit und Übertragungslatenz – Zeitliche Schranken . . . . .	17
2.3.1.3. Jitter – Zeitlicher Versatz . . . . .	18
2.3.1.4. Datenrate – Bedarf an Systemkapazität . . . . .	19
2.3.1.5. Paketverlustrate – Maß der Zuverlässigkeit . . . . .	20
2.3.2. Anforderungsprofile der Feldebene . . . . .	20
2.3.2.1. Vorbetrachtungen . . . . .	20
2.3.2.2. Profiltyp (a): Fertigungszelle . . . . .	21
2.3.2.3. Profiltyp (b): Sensor-Aktor-Netzwerke . . . . .	22
2.3.2.4. Profiltyp (c): Motion-Control-basierte Anwendungen . . . . .	22
2.3.3. Einfluss von Mobilität . . . . .	23
2.4. Weitere Randbedingungen . . . . .	25
2.4.1. Adaptivität und sporadische Kommunikation . . . . .	25
2.4.2. Maschinen- und Informationssicherheit . . . . .	25
2.4.3. Industrieller Funkkanal und -regulierung . . . . .	26
2.5. Zusammenfassung . . . . .	28

<b>3. Technische Bestandsaufnahme</b>	<b>30</b>
3.1. Vorbetrachtungen . . . . .	30
3.2. Drahtgebundene industrielle Kommunikationssysteme . . . . .	30
3.2.1. Funktionsweise von Industrial-Ethernet . . . . .	31
3.2.1.1. Protokollstapel von Industrial Ethernet . . . . .	31
3.2.1.2. Industrial-Ethernet-Standards . . . . .	32
3.2.2. Klassifizierung und Entwicklungstrends . . . . .	33
3.3. Funkbasierte industrielle Kommunikationssysteme . . . . .	34
3.3.1. Einsatz von Funkstandards . . . . .	34
3.3.1.1. IEEE-802.xx-Familie . . . . .	34
3.3.1.1.1. IEEE 802.11 – WLAN . . . . .	34
3.3.1.1.2. IEEE 802.15.1 – Bluetooth . . . . .	36
3.3.1.1.3. IEEE 802.15.4 – Wireless Sensor Networks . . . . .	37
3.3.1.2. Telekommunikationsstandards . . . . .	38
3.3.1.2.1. Digital Enhanced Cordless Telecommunications – DECT . . . . .	38
3.3.1.2.2. Mobilfunkstandards – GSM, UMTS, LTE & 5G . . . . .	39
3.3.2. Erweiterungen für Funkstandards . . . . .	40
3.3.2.1. Deterministischer Medienzugriffsverfahren . . . . .	40
3.3.2.2. Robustheit durch Redundanz . . . . .	42
3.3.2.3. Erweiterungen höherer Protokollschichten . . . . .	43
3.3.3. Proprietäre industrielle Funksysteme . . . . .	43
3.3.3.1. Wireless Interface for Sensors and Actuators – WISA . . . . .	44
3.3.3.2. Wireless Sensor/Actuator Network – WSA . . . . .	45
3.3.3.3. IR-UWB-basiertes Kommunikationssystem . . . . .	45
3.4. Integration funkbasierter Kommunikationssysteme . . . . .	46
3.5. Zusammenfassung . . . . .	47
<b>4. Zwischenfazit I</b>	<b>49</b>
4.1. Einordnung und Bewertung . . . . .	49
4.2. Weitere Vorgehensweise . . . . .	51
<b>II. Modellbildung und Systematisierung</b>	<b>53</b>
<b>5. Modellbildung</b>	<b>54</b>
5.1. Vorbetrachtungen . . . . .	54
5.2. Schichtenmodell . . . . .	55
5.2.1. Kommunikationsschicht . . . . .	55
5.2.1.1. Service der Kommunikationsschicht . . . . .	55
5.2.1.2. Elemente der Kommunikationsschicht . . . . .	56
5.2.2. Anwendungsschicht . . . . .	57
5.2.2.1. Logische Geräteverbindungen . . . . .	57
5.2.2.2. Offene und geschlossene Regelkreise . . . . .	58
5.3. Systemmodell . . . . .	58
5.3.1. Topologien der Feldebene . . . . .	58
5.3.2. Zyklische Kommunikation . . . . .	59



5.4. Parametermodelle . . . . .	60
5.4.1. Latenz der Übertragung . . . . .	60
5.4.1.1. Drahtgebundene Übertragung . . . . .	61
5.4.1.2. Funkbasierte Übertragung . . . . .	62
5.4.1.2.1. Medienzugriffsverfahren . . . . .	62
5.4.1.2.2. Asymmetrie der Übertragungsstrecke . . . . .	64
5.4.1.2.3. Bandbreite und Paketstruktur . . . . .	65
5.4.1.2.4. Resultierende Übertragungslatenz . . . . .	66
5.4.1.3. Koppelnde Komponente . . . . .	67
5.4.1.3.1. Latenz der Koppelkomponente . . . . .	67
5.4.1.3.2. Resultierende Übertragungslatenz . . . . .	68
5.4.2. Synchronisation des Systems . . . . .	68
5.4.2.1. Synchronität zwischen Geräten . . . . .	68
5.4.2.2. Isochronität eines Gerätes . . . . .	69
5.4.2.3. Synchronisationsklassen . . . . .	69
5.4.3. Echtzeitfähigkeit . . . . .	70
5.4.3.1. Eigenschaften von Echtzeit . . . . .	70
5.4.3.2. Kategorien von Echtzeit . . . . .	72
5.4.4. Robustheit der Übertragung . . . . .	72
5.4.4.1. Mittlere Paketverlustrate . . . . .	73
5.4.4.2. Bündelfehler . . . . .	74
5.5. Zusammenfassung und Bewertung . . . . .	75
<b>6. Systemarchitektur</b>	<b>76</b>
6.1. Vorbetrachtungen . . . . .	76
6.1.1. Paradigma I - Transparenz für Anwendungsschicht . . . . .	76
6.1.2. Paradigma II - Bewusster Einsatz von Funktechnik . . . . .	77
6.2. Übertragungskonzepte für funkbasierte Verfahren . . . . .	78
6.2.1. Physikalische Verbindungskonzepte . . . . .	78
6.2.1.1. Einzelpunktverbindungen . . . . .	78
6.2.1.2. Mehrpunktverbindungen . . . . .	79
6.2.2. Vermittlungskonzepte für Datenpakete . . . . .	80
6.2.2.1. Explizite Paketzuweisung . . . . .	80
6.2.2.2. Implizite Paketverteilung . . . . .	81
6.3. Anbindungskonzepte für funkbasierte Verfahren . . . . .	81
6.3.1. Kopplung auf Bitübertragungsschicht . . . . .	81
6.3.2. Kopplung auf Sicherungsschicht . . . . .	82
6.3.3. Asymmetrische Kopplung . . . . .	83
6.4. Zusammenfassung und Bewertung . . . . .	83
6.4.1. Architekturtreiber vs. Performance der Komponenten . . . . .	84
6.4.2. Systemarchitektur für hybrides Kommunikationssystem . . . . .	84
6.4.2.1. Bewertung der Koppelkomponente . . . . .	84
6.4.2.2. Bewertung aus Systemsicht . . . . .	85

<b>7. Systementwurf</b>	<b>88</b>
7.1. Komponenten des Kommunikationssystems . . . . .	88
7.1.1. Funktechnologie der Koppelkomponente . . . . .	88
7.1.1.1. Leistungsfähigkeit der IEEE-802.xx-Familie . . . . .	89
7.1.1.1.1. Datenratenbedarf vs. Systemkapazität . . . . .	89
7.1.1.1.2. Latenz und Echtzeitfähigkeit . . . . .	94
7.1.1.2. Idealtypisch proprietäres Echtzeitfunksystem . . . . .	100
7.1.1.2.1. Echtzeitfähige Grundstruktur . . . . .	100
7.1.1.2.2. Deterministischer Medienzugriff . . . . .	102
7.1.1.2.3. Umsetzung als Mehrträgersystem . . . . .	104
7.1.2. Industrial Ethernet der Koppelkomponente . . . . .	111
7.1.2.1. Leistungsfähigkeit von sercos III . . . . .	112
7.1.2.2. Kerneigenschaften und Ausführungsformen . . . . .	113
7.1.2.2.1. Deterministischer Medienzugriff – Summenrahmenprotokoll . . . . .	113
7.1.2.2.2. Effizienz der Datenpaketstruktur – Multi-Device-Frame . . . . .	113
7.1.3. Konvergenzschicht der Koppelkomponente . . . . .	114
7.1.3.1. Industrial-Ethernet-Brücke . . . . .	114
7.1.3.2. Konvertierung der Protokolle . . . . .	115
7.2. Querschnittsfunktionen . . . . .	117
7.2.1. Engineering des Kommunikationssystems . . . . .	117
7.2.1.1. Konfiguration der Koppelkomponente . . . . .	117
7.2.1.2. Strategien zur Inbetriebnahme . . . . .	118
7.2.2. Verfahren zur Synchronisation . . . . .	120
7.2.2.1. Vorbetrachtungen – Gängige Verfahren . . . . .	120
7.2.2.1.1. Netzwerk-Domäne . . . . .	120
7.2.2.1.2. Industrial-Ethernet-Systeme . . . . .	122
7.2.2.1.3. Funksysteme . . . . .	123
7.2.2.1.4. Bewertung . . . . .	124
7.2.2.2. Verfahren I – Grobe Synchronisation . . . . .	125
7.2.2.3. Verfahren II – Feine Synchronisation . . . . .	127
7.2.3. Optimierung der Performance . . . . .	130
7.2.3.1. Organisatorische Maßnahmen . . . . .	130
7.2.3.1.1. Funknetz – Planung und Regulierung . . . . .	130
7.2.3.1.2. Antennentechnik – Robustere Funkübertragung . . . . .	130
7.2.3.2. Technische Maßnahmen . . . . .	131
7.2.3.2.1. Paketformung I – Sub-System angepasste Formung . . . . .	131
7.2.3.2.2. Paketformung II – Broadcast in mehrere Sub-Systeme . . . . .	132
7.2.3.2.3. Paketabweisung – Präventives Verwerfen von Datenpaketen . . . . .	133
7.2.3.2.4. Übertaktung – Zykluszeit im steuerungsfernen Sub-System . . . . .	134
7.2.3.2.5. Feintuning – Phasenregelschleife . . . . .	134
7.2.3.3. Bewertung des Optimierungspotenzials . . . . .	134
7.3. Zusammenfassung . . . . .	136
<b>8. Zwischenfazit II</b>	<b>138</b>
8.1. Treiber und Konzepte . . . . .	138
8.2. Bewertung der Lösungen . . . . .	139

<b>III. Evaluierung mit Fallstudien</b>	<b>143</b>
<b>9. Lösung mit Standardkomponenten</b>	<b>144</b>
9.1. Anwendungsbeispiel Rundtaktmaschine . . . . .	144
9.1.1. Eigenschaften der Anwendung . . . . .	144
9.1.2. Resultierende Anforderungen . . . . .	146
9.2. Umsetzung mit Demonstratorsystem . . . . .	147
9.2.1. Demonstratorsystem . . . . .	147
9.2.1.1. Aufbau der Koppelkomponente . . . . .	148
9.2.1.2. Konfiguration und Inbetriebnahme . . . . .	149
9.2.2. Ergebnisse . . . . .	149
9.2.2.1. Messgrößen und Parameter . . . . .	149
9.2.2.2. Übertragungslatenz . . . . .	151
9.2.2.3. Zwischenankunftszeit . . . . .	152
9.2.2.4. Zeitlicher Versatz . . . . .	154
9.2.3. Bewertung . . . . .	154
<b>10. Lösungsansatz mit proprietärem Funkverfahren</b>	<b>156</b>
10.1. Anwendungsbeispiel Verpackungsmaschine . . . . .	156
10.1.1. Eigenschaften der Anwendung . . . . .	156
10.1.2. Resultierende Anforderungen . . . . .	158
10.2. Umsetzung mit Simulationsstudie . . . . .	159
10.2.1. Simulationsstudie . . . . .	159
10.2.1.1. Zielstellung . . . . .	159
10.2.1.2. Simulationsmodell . . . . .	161
10.2.2. Ergebnisse . . . . .	162
10.2.2.1. $N'$ -Batch . . . . .	163
10.2.2.2. $OPT$ -Batch . . . . .	166
10.2.2.3. $MAC$ -Batch . . . . .	169
10.2.3. Bewertung . . . . .	171
<b>11. Schlussfazit</b>	<b>175</b>
11.1. Retrospektive – Beitrag . . . . .	175
11.2. Zukunftsperspektive – Ausblick . . . . .	178
<b>IV. Anhang</b>	<b>i</b>
<b>A. Serviceorientiertes Schichtenmodell</b>	<b>ii</b>
<b>B. Grundlegende Betriebsarten</b>	<b>iii</b>
<b>C. Begriffsklärung – Datenpaket</b>	<b>vii</b>
<b>D. Latenzberechnung für drahtgebundene Übertragung</b>	<b>viii</b>
<b>E. Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>F. Tabellenverzeichnis</b>	<b>xiii</b>

<b>G. Akronyme</b>	<b>xiv</b>
<b>H. Literaturverzeichnis</b>	<b>xx</b>

# 1. Einleitung

Der Einsatz von Funktechnologien als integraler Bestandteil industrieller Kommunikationssysteme erfreut sich in den letzten Jahren und Jahrzehnten einer zunehmenden Beliebtheit. Insbesondere in spezifischen Teilbereichen der Automatisierungstechnik wie der Prozess- und Gebäudeautomatisierung haben sich Wireless Sensor Networks (WSN) als integraler Bestandteil industrieller Kommunikationssysteme etabliert. Der Grund hierfür liegt darin, dass Funksysteme zum einen Vorteile wie eine vereinfachte Installation, reduzierten Verkabelungsaufwand oder erhöhte Mobilität bieten. Zum anderen können die Anforderungen in diesen Anwendungsbereichen – ganz im Gegensatz zu Anwendungen im Teilbereich der Fertigungsautomatisierung – hinsichtlich von Zuverlässigkeit, Datenratenbedarf und Echtzeitfähigkeit der Datenübertragung häufig bereits erfüllt werden.

Über die verschiedenen Branchen der Automatisierung hinweg spannt sich jedoch ein bunter Strauß industrieller Anwendungen auf; entsprechend unterschiedlich sind die aus diesen Anwendungen erwachsenden Anforderungen an ein Kommunikationssystem. Dies spiegelt sich wiederum in der enormen Anzahl existierender industrieller Kommunikationssysteme und -standards wider – ob funkbasiert oder drahtgebunden [1].

Stellt man industrielle Kommunikationssysteme den Kommunikationssystemen der Consumer-Elektronik gegenüber, so zeichnen sich die industriellen Systeme insbesondere durch ihre *Echtzeitfähigkeit* aus. Kurz und prägnant ist damit gemeint, dass ein Kommunikationssystem die Daten einer Anwendung robust und zuverlässig innerhalb gegebener zeitlicher Schranken von einer Datenquelle zu einer Datensenke überträgt.

Vergleicht man im weiteren die Anforderungen verschiedener Branchen der Automatisierungstechnik hinsichtlich des Kriteriums Echtzeitfähigkeit, so fallen Anwendungen der bereits erwähnten Prozess- und Gebäudeautomatisierung in die Kategorie der *weichen Echtzeit*. Demgegenüber ordnet man Anwendungen der Fertigungsautomatisierung typischerweise der *harten Echtzeit* oder der *isochronen Echtzeit* zu. Unbenommen dieser schwereren Echtzeitanforderungen finden sich auch und gerade in der Fertigungsautomatisierung zahlreiche Anwendungsfälle, für die der Einsatz von Funktechnologie entscheidende Vorteile bringt oder überhaupt erst einen *Business Enabler* darstellt.

In eben diesem Spannungsfeld zwischen Vorteilen, Potenzialen und Chancen auf der einen Seite und Herausforderungen, Machbarkeit und Umsetzungsstrategien auf der anderen Seite setzt die vorliegende Arbeit an. Können funkbasierte Übertragungsverfahren in der Fertigungsautomatisierung überhaupt eingesetzt werden? Wie können existierende drahtgebundene Systeme um funkbasierte Systeme erweitert werden? Wo liegen die Grenzen des technisch Machbaren, wo die des wirtschaftlich Sinnvollen?

Demgemäß richtet sich der Fokus dieser Arbeit auf industrielle Anwendungen der *Feldebene*

der *Fertigungsautomatisierung*. Im Speziellen werden Anwendungen der elektrischen Antriebstechnik betrachtet, die typischerweise eine Regelungsschleife als Closed-Loop-Anwendung implementieren. Neben der Unterteilung nach Branchen wie der *Fertigungsautomatisierung*, die einer horizontalen Klassifizierung entspricht, zählt die *Feldebene* zur untersten, maschinen-nahen Ebene im Bilde der Automatisierungspyramide, die eine vertikale Klassifizierung der Automatisierung repräsentiert. Charakteristisch für Anwendungen dieser Kategorie sind harte und isochrone *Echtzeitanforderungen*.

Das gängige *industrielle Kommunikationssystem* der Feldebene ist der drahtgebundene Feldbus oder dessen Nachfolger Industrial Ethernet [2]. Auch hier gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Ausführungsformen, die auf sogenannte Industrial-Ethernet-Profile abgebildet werden [3]. In dieser Arbeit richtet sich der Fokus auf Industrial-Ethernet-Systeme, die auf Anwendungen der Antriebstechnik mit isochronen Echtzeitanforderungen ausgelegt sind. Ein Vertreter dieser Klasse von Industrial-Ethernet-Systemen ist sercos III [4] [5], das durch diese Arbeit hinweg als konkretes Fallbeispiel eines echtzeitfähigen Industrial-Ethernet-Systems herangezogen wird.

Eingebettet in dieses Umfeld werden schließlich die *Einsatzmöglichkeiten funkbasierter Datenübertragung* beleuchtet, was den Kern der Ausarbeitungen repräsentiert. Im Kontext dieser Arbeit ist unter der funkbasierten Übertragung ausschließlich die reine *Datenübertragung* zu verstehen. Die Betrachtung von funkbasierter Energieübertragung, beispielsweise mittels Energy Harvesting, bietet sich zwar für reine Sensorknoten an, liegt für industrielle Anwendungen mit komplexen Feldgeräten aber außerhalb eines sinnvollen Anwendungsbereiches. Hier benötigen Feldgeräte eine explizite Leistungszuführung, die Zwischenkreis, Endstufen und gegebenenfalls einen integrierten Motor versorgt.

### 1.1. Motivation für die Arbeit

Anwendungen der elektrischen Antriebstechnik stellen klassische Vertreter von industriellen Anwendungen der Feldebene der Fertigungsautomatisierung dar. Sie werden typischerweise mittels einer Fertigungs- und Produktionslinie, im weiteren Sinne mittels einer Maschine, realisiert. Maschinen wiederum werden entweder als ein monolithischer Maschinenblock ausgeführt, oder sie setzen sich aus mehreren, mehr oder weniger eigenständigen Maschinenteilen zusammen, die Teilaufgaben übernehmen und diese durch kontrolliertes Interagieren zur Gesamtfunktionalität der Anwendung zusammenführen.

Den schematischen Aufbau einer typischen Anwendung der Feldebene der Fertigungsautomatisierung veranschaulicht Abbildung 1.1. Die Anwendung wird durch eine Maschine realisiert, die sich aus einer übergeordneten Steuerung und mehreren Maschinenteile, respektive Feldgerätegruppen und Feldgeräten, zusammensetzt. Dabei wird die Steuerung der Steuerungsebene, die Maschinenteile samt ihrer Feldgeräte werden der Geräteebene zugeordnet. Für einige Maschinentypen reicht es aus, diese ausschließlich aus fest montierten, statischen Maschinenteilen aufzubauen. Beispiele hierfür sind klassische Numerical Control (NC)- oder Druckmaschinen. Für diese Anwendungen bringt der Einsatz von Funktechnologie keinen Mehrwert, da existierende Feldbus- und Industrial-Ethernet-Systeme als drahtgebundene Kommunikationssysteme ohne Einschränkung ihren Dienst erfüllen.

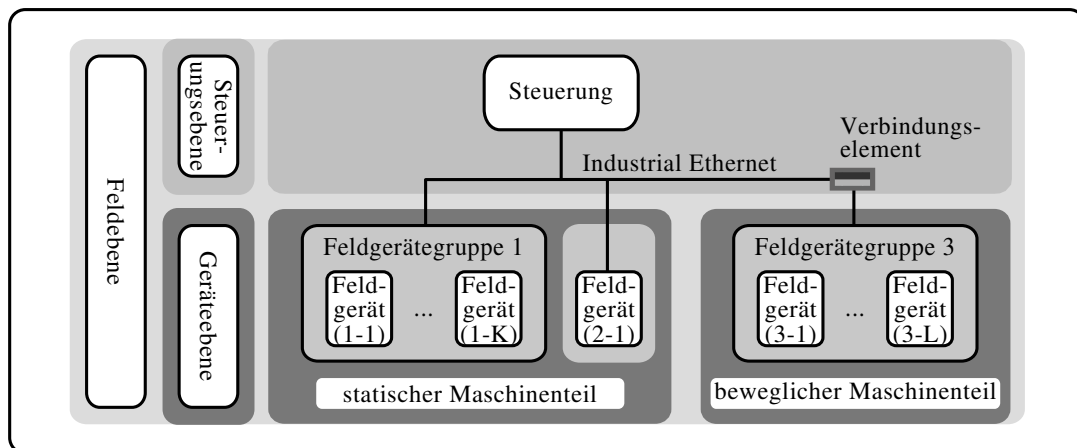


Abbildung 1.1.: Schematische Ausführung einer industriellen Anwendung auf Feldebene.

Ein anderes Bild ergibt sich für Anwendungen der Verpackungsindustrie oder bei Werkzeugmaschinen, die typischerweise bewegliche Maschinenteile einsetzen. Beispielhaft genannt seien Rundtaktmaschinen, bei denen Werkstücke auf endlos rotierenden Drehtischen von mehreren Werkzeugen zeitgleich bearbeitet werden. Wie in Abbildung 1.1 schematisch angedeutet, werden bei solchen Maschinen die beweglichen Maschinenteile samt ihrer Feldgeräte über ein Verbindungselement angebunden. Typische Ausführungen für Verbindungselemente sind Schleppkabel oder Schleifringe. Basieren diese Elemente auch auf ausgereifter Technik, so steigen bei einer wachsenden Zahl zu übertragender Signale sowohl die Anschaffungs- als auch die Wartungskosten für diese Elemente. Zudem wächst die Fehleranfälligkeit, sodass eine Entkopplung von Daten- und Leistungsübertragung beziehungsweise eine Entkopplung einzelner Datensignale mittels Funktechnologie eine vielversprechende Lösungsmöglichkeit darstellt. Im folgenden sind daher systematisch diejenigen Gründe aufgezählt, die den Einsatz von Funktechnologie auf der Feldebene der Fertigungsautomatisierung motivieren:

- **Verschleiß:** Um bewegliche Maschinenteile anzubinden, werden Verbindungselemente eingesetzt. Je nach Aufbau einer Maschine und der Trajektorie ihrer beweglichen Maschinenteile unterliegen herkömmliche Verbindungselemente wie Schleifringe oder Schleppkabel einem mehr oder weniger starken Verschleiß. Insbesondere mit wachsender Anzahl der zu übertragenden Signale steigen auch die Anschaffungskosten bei gleichzeitiger Verkürzung der Wartungsintervalle. Bereits die Trennung von Leistungs- und Datenübertragung kann bei diesen komplexen Ausführungen signifikant Kosten einsparen.
- **Installationsaufwand:** Das Ankoppeln beweglicher Maschinenteile durch Funktechnologie spart den Aufbau und die Auslegung der Verbindungselemente. Darüber hinaus entfällt der Aufwand für die Verkabelung, insbesondere bei größeren Maschinen mit einer Vielzahl beweglicher Maschinenteile. Der initiale Installationsaufwand kann so durch Funktechnologie reduziert werden.
- **Erweiterbarkeit:** Unterstützt eine bestehende Maschine bereits die funkbasierte Datenübertragung zur Anbindung beweglicher Maschinenteile, so ist der Ausbau der Maschine um weitere bewegliche Maschinenteile aufgrund des aufgespannten Funksystems einfach und mit geringem Aufwand zu realisieren.

- *Konfigurierbarkeit*: In ähnlicher Weise wie bei der initialen Installation oder der Erweiterung einer industriellen Anwendung vereinfacht sich beim Einsatz von Funktechnologie der Umbau und die Re-Konfiguration einer Maschine.
- *Flexibilität*: Im Vergleich zu alternativen berührungslosen – induktiven, kapazitiven, oder optischen – Übertragungstechniken bietet die funkbasierte Datenübertragung den Vorteil einer größeren Reichweite und einer besseren Materialdurchdringung. Daraus resultieren höhere Freiheitsgrade, die je nach Umgebungsbedingungen Vorteile bieten.
- *Mobilität*: Funktechnologie ist de-facto dazu prädestiniert, mobile Komponenten zu vernetzen. Für die Feldebene ist hierzu klar zu definieren, welche Arten der Mobilität Berücksichtigung finden sollen: In der Regel beschreiben bewegliche Maschinenteile eine feste Trajektorie, ganz im Gegensatz zu sich frei beweglichen Komponenten. In der Beispielausführung von Abbildung 1.1 bewegen sich die fest installierte Feldgerätegruppe (1) und Feldgerät (2-1) relativ zu der beweglichen Feldgerätegruppe (3). Die Feldgeräte (3-1), ..., (3-L) des beweglichen Maschinenteils hingegen verbleiben relativ zueinander in Ruhe, beispielsweise auf einem gemeinsamen Schlitten oder Drehtisch. Ein wichtiges Merkmal einer Anwendung ist in diesem Zusammenhang die Anzahl ihrer beweglichen Maschinenteile.
- *Nachfrage*: Aus Sicht des Marktes, insbesondere auch aus dem traditionell eher konservativen Umfeld des Maschinenbaus, mehrt sich die Bereitschaft, funkbasierte Kommunikationssysteme je nach Anwendungsfall einzusetzen [6] [7] [8].

Im Ergebnis subsumieren sich die genannten Vorteile und Chancen aus Kundensicht durchaus zu einem mitunter signifikanten Mehrwert. Können beispielsweise dedizierte Anwendungsfälle mit konventionellen drahtgebundenen Kommunikationssystemen nicht oder nur schwerlich realisiert werden, stellt der Einsatz von Funktechnologie überhaupt erst einen Business Enabler dar. Darüber hinaus kann dem Kunden potenziell höherer Komfort und eine bessere User Experience (UX) geboten werden, wenn Inbetriebnahme und Pflege einer Maschine einfach zu bewerkstelligen sind. Diese bessere Handhabung einer Maschine schlägt sich typischerweise auch in einer Kostenersparnis nieder. Aus Markt- und Kundensicht besitzt die Funktechnologie für industrielle Anwendungen schlussendlich großes Potenzial, dem zunächst technische Lösungen den Weg bereiten müssen.

Den aufgezeigten Potenzialen der Funktechnologie stehen eine Reihe technischer Herausforderungen gegenüber, insbesondere die Anforderungen hinsichtlich der bereits aufgeführten Echtzeitfähigkeit eines industriellen Kommunikationssystems. In diesem Kontext ist es trotz zahlreicher Forschungsarbeiten – beispielsweise wurde die Echtzeitfähigkeit punktuell für dedizierte Anwendungsfälle [9], dedizierte Funkstandards [10] oder für die Portierung dedizierter Feldbusse [11] beziehungsweise Industrial-Ethernet-Systeme [12] optimiert, – nach wie vor der Stand der Technik, dass für industrielle Anwendungen auf Feldebene der Fertigungsautomatisierung, insbesondere für Antriebsregelungen, keine geeigneten funkbasierten Lösungen, geschweige denn basierend auf off-the-shelf Funkkomponenten, existieren [13]. Eben diese Lücke adressiert die vorliegende Arbeit.

## 1.2. Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in drei Teile: Teil I widmet sich zu Beginn der *Bestandsaufnahme und Anforderungsanalyse*. Zunächst erfolgt eine detaillierte Charakterisierung industrieller



Anwendungen auf Feldebene der Fertigungsautomatisierung im Kontext der allgemeinen Automatisierungstechnik. Ausgehend davon werden Eigenschaften von industriellen Anwendungen herausgearbeitet im Hinblick darauf, die typischen Anforderungen an das unterliegende Kommunikationssystem zu ermitteln. Die Ergebnisse dieser *Anforderungsanalyse* werden in kompakten Anforderungsprofilen formuliert. Neben den Anforderungen an industrielle Kommunikationssysteme erfolgt eine *technische Bestandsaufnahme* für industrielle Kommunikationssysteme. Dabei werden sowohl drahtgebundene, als auch funkbasierte industrielle Kommunikationssysteme, als auch die Integration von neuen Funktechnologien in bestehende drahtgebundene Infrastrukturen analysiert. Ein erstes *Zwischenfazit* rundet Teil I der Arbeit ab. Dabei wird eine abschließende Bewertung der Bestandsaufnahme und des Problemraums vorgenommen und die Vorgehensweise für die weiteren Teile der Arbeit aufgezeigt.

Teil II bildet mit der *Modellbildung und Systematisierung* den theoretischen Kern der Arbeit. Zunächst wird im Rahmen der *Modellbildung* ein Schichten-basiertes Systemmodell entwickelt, das sowohl nachrichtentechnische Grundlagen, als auch die für industrielle Kommunikationssysteme typischen Eigenschaften berücksichtigt. Ferner werden Parametermodelle für die wichtigen Kenngrößen – beispielsweise für die Übertragungslatenz – hergeleitet, die im weiteren zur Evaluierung herangezogen werden. Für die *Systemarchitektur* werden Konzepte zur funkbasierten Übertragung, als auch zur Anbindung funkbasierter Verfahren an existierende drahtgebundene Kommunikationssysteme bewertet, die im Ergebnis zur Systemarchitektur eines hybriden industriellen Kommunikationssystems zusammengefügt werden. Die einzelnen Bestandteile dieser Architektur, aber auch Querschnittsfunktionen wie Synchronisationsverfahren, werden im *Systementwurf* mit Leben befüllt. Ein weiteres *Zwischenfazit* rekapituliert die theoretischen Ergebnisse aus Teil II der Arbeit, indem Architekturtreiber und Konzepte gegenübergestellt, sowie die Lösungsmöglichkeiten bewertet werden.

Teil III adressiert mit der *Evaluierung von Fallstudien* den praktischen Teil der Arbeit. In einem ersten Anwendungsbeispiel wird eine Rundtaktmaschine betrachtet, für die eine Umsetzung des hybriden industriellen Kommunikationssystems mittels eines Demonstratorsystems aufgezeigt wird – eine *Lösung mit Standardkomponenten*. Basierend auf dieser Lösung wird im weiteren ein *Lösungsansatz mit proprietärem Funkverfahren* im Zuge einer Simulationsstudie untersucht, die auf das Anwendungsbeispiel einer Verpackungsmaschine angewendet wird.

Im *Schlussfazit* werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit rekapituliert sowie ein Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder gegeben. Dort werden auch die aus dieser Arbeit hervorgegangenen wissenschaftlichen Beiträge aufgezeigt und die entsprechenden Veröffentlichungen benannt.



**Teil I.**

**Bestandsaufnahme und  
Anforderungsanalyse**

## 2. Anforderungsanalyse

Im Zentrum dieser Arbeit steht die funkbasierte Datenübertragung in industriellen Kommunikationssystemen für Anwendungen auf Feldebene der Fertigungsautomatisierung. Ziel dieses Kapitels ist es, den entsprechenden Kontext für das Kernthema herzustellen. Zum einen soll zunächst Domänenwissen vermittelt werden. Basierend darauf soll zum anderen eine eingehende Anforderungsanalyse erfolgen.

Im Detail wird dazu in Abschnitt 2.1 die Fertigungsautomatisierung als eine der zahlreichen Branchen der Automatisierung charakterisiert und eingeordnet. Danach wird in Abschnitt 2.2 die Feldebene als die unterste Hierarchiestufe der Fertigungsautomatisierung identifiziert und es werden deren typische industrielle Anwendungen vorgestellt. In Abschnitt 2.3 wird das industrielle Kommunikationssystem der Feldebene und dessen Kenngrößen beschrieben sowie die Anforderungen charakteristischer industrieller Anwendungen als Anforderungsprofile formuliert. Mit Abschnitt 2.4 werden schließlich noch Randbedingungen benannt, die nicht im Fokus der Arbeit stehen. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Anforderungsanalyse fasst Abschnitt 2.5 zusammen.

### 2.1. Kategorisierung industrieller Anwendungen

In diesem Abschnitt sollen industrielle Anwendungen der Feldebene der Fertigungsautomatisierung im Kontext der Vielzahl von Anwendungsfeldern der Automatisierungstechnik betrachtet werden. Im folgenden werden zum einen die unterschiedlichen Branchen der Automatisierungstechnik beleuchtet. Zum anderen werden die Hierarchieebenen innerhalb der Fertigungsautomatisierung aufgezeigt, mit dem Ziel, den Wirkungsbereich und die Grenzen der Feldebene herauszuarbeiten.

#### 2.1.1. Horizontale Unterteilung - Branchen der Automatisierungstechnik

Betrachtet man die verschiedenen Anwendungsfelder der Automatisierungstechnik im Sinne einer horizontalen Unterteilung, so kristallisieren sich daraus die Branchen der Automatisierung heraus. Bekannteste Branchenvertreter sind beispielsweise die Prozess-, Gebäude- oder Fertigungsautomatisierung, auf die sich im folgenden ohne Beschränkung der Allgemeinheit konzentriert werden soll. Gemein ist all diesen Branchen, dass jede einzelne Branche selbst wiederum eine Vielzahl industrieller Anwendungen aufweist, die jede für sich genommen mit individuellen Anforderungen einhergeht.

Im Sinne einer qualitativen Einschätzung soll dennoch festgehalten werden, welches die wesentlichen Anforderungen ausgewählter Branchen sind. Die Intention hinter diesem Vorgehen besteht darin, eine erste Einordnung treffen zu können, in wie weit die charakteristischen Anforderungen einer bestimmten Branche Einfluss auf ihr zugehöriges industrielles Kommunikationssystem haben.

### 2.1.1.1. Gebäudeautomatisierung

Im Zuge des Hypes um das Thema *Smarthome*, also der Vernetzung und Automatisierung privater Haushalte, sonnt sich die Gebäudeautomatisierung in neuem Glanz. Dabei ist die Gebäudeautomatisierung im industriellen Kontext bereits seit geraumer Zeit über die Norm DIN 276 [14] zur Ermittlung von Kosten im Bauwesen verankert. Wie es der Titel dieser Norm bereits ausdrückt, kommen den Kosten einer Automatisierungslösung entscheidende Bedeutung bei. Im industriellen Bereich der Gebäudeautomatisierung spielt ferner die Robustheit für den Innen- wie Außeneinsatz gemäß sogenannter International Protection (IP)-Schutzklassen [15] eine wichtige Rolle, die spezifizierte Härtegrade für Gerätehardware und Gehäuse erfordern.

Für den smarten Heimbereich sind weiterhin Kompatibilität und Erweiterbarkeit gefragte Kriterien bei Endkunden, wobei sich bisher keiner der verwendeten Standards noch keines der existierenden Ökosysteme am Markt als de facto Lösung durchsetzen konnte. In puncto Vernetzung sind mit dem Building Automation and Control Networks (BACnet) [16] und dem Feldbus der Gebäudeautomation (KNX) [17] die prominentesten Vertreter für (professionelle) Protokolle und Bussysteme benannt, die bereits Erweiterungen für funkbasierte Technologien einbeziehen. Im Heimbereich finden bereits zahlreiche funkbasierte Lösungen Verwendung, vielmehr stellt der Einsatz von Funktechnik gar einen der Business Enabler für den Erfolg von Smarthome dar. Hier bietet der Markt Anbieter kompletter Gesamtsysteme wie Homematic IP<sup>1</sup> oder Qivicon<sup>2</sup>. Daneben gibt es eine Reihe von Konsortien, in denen sich Hersteller mit dem Ziel der Vereinheitlichung und Standardisierung zusammenfinden. Somit arbeiten zwar nun Produkte und Protokolle unterschiedlicher Hersteller eines Konsortiums wie der EnOcean<sup>3</sup>-, ZigBee<sup>4</sup>- oder Thread<sup>5</sup>-Alliance miteinander, von einer weitreichenden Harmonisierung in Form eines globalen, einheitlichen Standards kann nach wie vor aber nicht die Rede sein.

Auf technischer Ebene zeichnen sich die eingesetzten Funkverfahren der Gebäudeautomatisierung durch hohe Energieeffizienz und niedrige Datenraten aus, was durch die unterliegenden Funkstandards wie Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.15.4 [18] oder proprietäre Verfahren in den lizenzfreien Industrial, Scientific and Medical (ISM)-Bändern bei 2,4 GHz, 433 MHz und 868 MHz erreicht wird. Harte Echtzeitschranken oder gar isochrone Echtzeitfähigkeit sind hingegen keine typischen Anforderungen der Gebäudeautomatisierung.

### 2.1.1.2. Prozessautomatisierung

Namhafter Vertreter der Prozessautomatisierung ist die Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik für Prozessindustrie (NAMUR)<sup>6</sup>. Hier vereinen sich die Branchenvertreter der Prozessautomatisierung, um unter anderem künftige Trends zu diskutieren und gemäß ihrer Interessen zu steuern. Industrielle Anwendungen in diesem Bereich umfassen beispielsweise Kläranlagen oder Färbereien. Funktechnik wird in erster Linie für unkritische Monitoring-, Mess- und Steuerungsaufgaben eingesetzt [19]. Häufig müssen Funktechnologien große Entfernungen im Innen- und Außenbereich überbrücken können. Dabei kann mangelnde Energieeffizienz der typischerweise batteriebetriebenen Geräte durch Mechanismen wie Energy

---

<sup>1</sup>[www.homematic-ip.com](http://www.homematic-ip.com)

<sup>2</sup>[www.qivicon.com](http://www.qivicon.com)

<sup>3</sup>[www.enocean-alliance.org](http://www.enocean-alliance.org)

<sup>4</sup>[www.zigbee.org](http://www.zigbee.org)

<sup>5</sup>[www.threadgroup.org](http://www.threadgroup.org)

<sup>6</sup>[www.namur.net](http://www.namur.net)

Harvesting kompensiert werden.

Wie andernorts in der Automatisierungstechnik gibt es auch für Funksysteme in der Prozessautomatisierung keine harmonisierte Norm. Stattdessen haben sich drei im Kern sehr ähnliche Funkstandards etabliert, die allesamt als International Electrotechnical Commission (IEC)-Standards veröffentlicht wurden. Folglich verwundert es nicht, dass die unteren Schichten des Kommunikationsstacks auf dem gleichen IEEE-Funkstandard 802.15.4 [20] basieren.

- WirelessHART [21] (IEC 62591) wurde als Erweiterung des Highway Addressable Remote Transducer (HART)-Kommunikationssystems entwickelt, das selbst als Teil der Feldbusnorm IEC 61158 [2] standardisiert ist. Wesentliche Treiber sind die Firmen *Emerson*, *ABB* sowie *Pepperl & Fuchs* im europäischen Markt.
- Unter Federführung der International Society of Automation (ISA) wurde der Standard ISA-100.11a [22] erarbeitet und als IEC 62734 [23] ratifiziert. Über das ISA100 *Wireless Compliance Institute* können Funkkomponenten gemäß ISA100.11a zertifiziert werden. Wesentliche Treiber sind die Firmen *Honeywell* und *Yokogawa* für den amerikanischen beziehungsweise den japanischen Markt.
- Wireless Networks for Industrial Automation - Process Automation (WIA-PA) [24] (IEC 62601) spezifiziert schließlich den chinesischen Funkstandard für die Prozessautomatisierung, der im Jahre 2017 zum IEC-Standard erhoben wurde.

Technologisch betrachtet, ähneln sich alle drei Standards und keiner besitzt ein Alleinstellungsmerkmal – Unique Selling Proposition (USP) – gegenüber den anderen. Beim Wettlauf um das *Time-to-Market* scheint WirelessHART im Vorteil, da der Standard schlicht als erster Standard auf dem Markt war.

### 2.1.1.3. Fertigungsautomatisierung

Industrielle Anwendungen der Fertigungsautomatisierung [25] werden überwiegend im Innenbereich einer Maschinenhalle ausgeführt. Die Werkstoffe und -stücke werden über einzelne Maschinen oder den Verbund mehrerer Maschinen gefertigt. An dieser Stelle seien klassische Vertreter wie Verpackungs-, Druck- oder Werkzeugmaschinen genannt. Eine strukturierte Ausarbeitung industrieller Anwendungen der Fertigungsautomatisierung erfolgt in Abschnitt 2.2.2.

Im Gegensatz zur Prozessautomatisierung zeichnen sich Anwendungen der Fertigungsautomatisierung überwiegend durch Steuer- und Regelungsaufgaben aus, die oftmals kritische Funktionen im Sinne von Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit realisieren. Daraus resultieren die Anforderungen für ein hohes Maß an Robustheit, Verfügbarkeit, sowie ein hoher Anspruch an das Echtzeitverhalten eines Kommunikationssystems. Eine systematische Klassifizierung dieser Anforderungen erfolgt in Abschnitt 2.3.2.

Um den Anforderungen der Fertigungsautomatisierung nachrichtentechnisch zu genügen, wurden eine Reihe dedizierter drahtgebundener Bussysteme entwickelt, die als standardisierte Feldbusprofile IEC 61784 [3] auf der allgemeinen Feldbusnorm IEC 61158 [2] aufsetzen. Abschnitt 3.2 berücksichtigt diese drahtgebundenen Kommunikationssysteme in der technischen Bestandsaufnahme. An dieser Stelle sei erwähnt, dass erstmals im Jahre 2016 der chinesische Standard Wireless Networks for Industrial Automation - Factory Automation

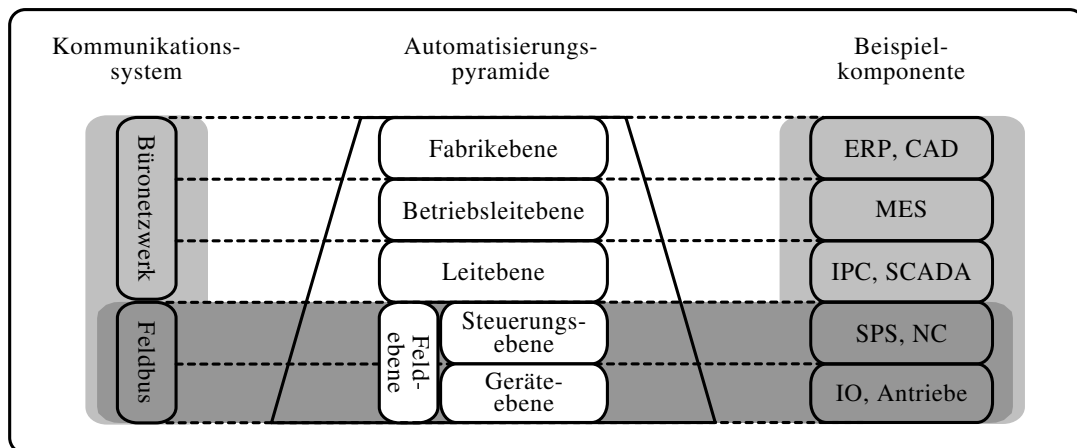


Abbildung 2.1.: Automatisierungspyramide – Hierarchieebenen der Automation nach [27].

(WIA-FA) als IEC 62948 [26] ratifiziert wurde und somit den ersten Funkstandard für die Fertigungsautomatisierung darstellt.

Gemäß der in diesem Abschnitt diskutierten horizontalen Unterteilung der Automatisierungstechnik fokussiert diese Arbeit im weiteren Verlauf ausschließlich auf die Fertigungsautomatisierung.

### 2.1.2. Vertikale Unterteilung - Automatisierungspyramide

Neben der Klassifizierung nach Branchen erlaubt die Automatisierungspyramide eine vertikale Unterteilung in Hierarchieebenen der Automatisierung. Abbildung 2.1 zeigt eine Darstellungsform der Automatisierungspyramide für die Fertigungsautomatisierung. Der Vollständigkeit wegen sei erwähnt, dass es eine Reihe weiterer Darstellungsformen der Automatisierungspyramide gibt [1]. Die vorliegende Form wurde gewählt, um der Fokussierung auf die Feldebene Rechnung zu tragen.

#### 2.1.2.1. Obere Hierarchieebenen

Als obere Hierarchieebenen der Automatisierungspyramide sind die Fabrik-, Betriebsleit- und (Prozess-)Leitebene dargestellt, die je nach Ausführung auch der Unternehmens- und Zellebene zugeordnet werden [1]. Charakteristische Komponenten der Leitebene sind Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)-Systeme, die vorrangig zur Überwachung und Steuerung der eigentlichen Steuerungskomponenten der Feldebene dienen. In der überlagerten Betriebsleitebene realisiert das Manufacturing Execution System (MES) die Überwachung nicht nur eines Prozesses, sondern der Prozesse eines gesamten Betriebs. Schließlich übernimmt das Enterprise Resource Planning (ERP)-System auf Fabrikebene die Planung und Steuerung aller unternehmerischen und betrieblichen Abläufe einschließlich des administrativen Bereiches eines Unternehmens [28].

#### 2.1.2.2. Untere Hierarchieebenen

Gemäß Abbildung 2.1 ordnet sich die Feldebene den unteren Hierarchieebenen der Automatisierungspyramide zu und umfasst die Steuerungs- und Geräteebene. Die Geräteebene selbst

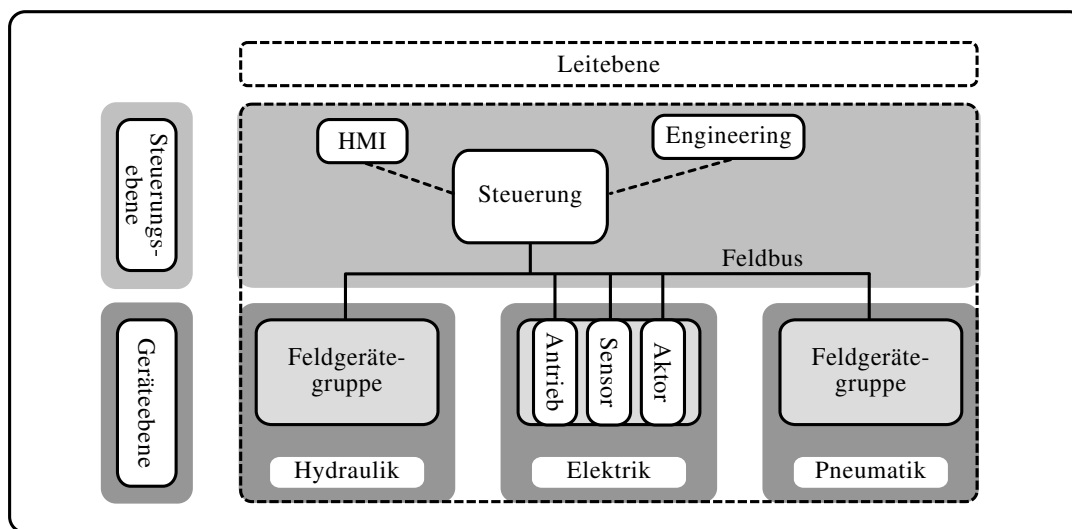


Abbildung 2.2.: Technologien auf Feldebene der Fertigungsautomatisierung.

wird häufig auch als Sensor-Aktor-Ebene bezeichnet.

Der Feldbus bildet das industrielle Kommunikationssystem der Feldebene. Über den Feldbus wird beispielsweise die Kommunikation zwischen Speicherprogrammierbarer Steuerung (SPS) und NC auf Steuerungsebene und den Sensoren, Antriebs- oder Gebermodulen auf Geräteebene realisiert. Typischerweise verbindet der Feldbus eine Vielzahl von Feldkomponenten miteinander, wobei die Netzknoten der einzelnen Feldkomponenten jeweils geringe Datenmengen in der Größenordnung einiger weniger Bytes austauschen. Dieser Datenaustausch erfolgt periodisch im Takt des Regelkreises der Steuerung.

Da die Feldebene der Fertigungsautomatisierung und ihre unterschiedlichen Anwendungen den Kern dieser Arbeit darstellen, wird diese Domäne im folgenden Abschnitt 2.2 vertiefend betrachtet.

## 2.2. Feldebene der Fertigungsautomatisierung

Dieser Abschnitt beleuchtet zunächst die Technologien und Komponenten, die auf der Feldebene in der Fertigungsautomatisierung zum Einsatz kommen. Im Anschluss werden die durch Komponenten und Technologien implementierten industriellen Anwendungen näher betrachtet, um aus den resultierenden Anforderungen auf Anwendungsebene auf entsprechende Anforderungen an das Kommunikationssystem rückschließen zu können.

### 2.2.1. Komponenten und Technologien

Um die Inhalte dieses Abschnitts zu veranschaulichen, stellt Abbildung 2.2 schematisch eine industrielle Anwendung der Fertigungsautomatisierung dar. Der aufgezeigte Ausschnitt zeigt die wesentlichen Komponenten, Technologien und deren Vernetzung auf Feldebene, die im folgenden detailliert werden.



### 2.2.1.1. Komponenten

Die zentrale Steuerung repräsentiert das Herz einer industriellen Anwendung auf Feldebene. Hier schließen sich die Regelungskreisläufe des technischen Prozesses. In Abhängigkeit von der konkreten Funktionalität führt die Steuerungskomponente über einen offenen Regelkreis Steuerungsaufgaben oder über einen geschlossenen Regelkreis Regelungsaufgaben aus. Unabhängig von der konkreten Funktionalität wird für die Komponente in der Automatisierungstechnik stets der Begriff *Steuerung* verwendet. Beispielausführungen einer Steuerung sind SPS, NC, Bewegungsregelungen (Motion-Control) oder Robotersteuerung.

Der Feldbus als industrielles Kommunikationssystem vernetzt die Steuerung mit den Feldgeräten der Geräteebene. Hier ist zwischen zwei wesentlichen Gerätegruppen zu unterscheiden, Sensoren und Aktoren. Betrachtet man einen geschlossenen Regelkreis, so dienen die Sensoren als Messglieder der Regelungsstrecke. Bei Motion-Control-Anwendungen werden typischerweise Gebermodule eingesetzt, um Position, Lage, Drehzahl und weitere physikalische Größen zu bestimmen und an die Steuerung zu übermitteln. Hierfür beinhalten Geber typischerweise eine Feldbus-kompatible Schnittstelle und können so nahtlos in das System integriert werden oder sind gar bereits integraler Bestandteil der Antriebskomponente.

Die Aktoren repräsentieren schließlich die Stellglieder der Regelungsstrecke. Bei Motion-Control wird die Aktor-Funktionalität in diesem Fall durch eine Antriebskomponente (Drive) realisiert, die ihrerseits selbst je nach Ausführung bereits dezentrale Steuerungs- und Regelungsaufgaben von der zentralen Steuerung übernehmen kann, um so die zentrale Steuerung zu entlasten. Im folgenden Abschnitt 2.2.1.2 werden nun die bei Aktoren und Antrieben eingesetzten Technologien beleuchtet.

### 2.2.1.2. Technologien

Wie in Abbildung 2.2 dargestellt kann eine industrielle Anwendung der Feldebene mittels verschiedener Antriebstechnologien umgesetzt werden. Begrenzt wird diese Auswahlmöglichkeit zumeist dadurch, dass der Erbauer einer Maschine keine ganzheitliche Lösung eines einzelnen Herstellers erhalten kann, da dieser nicht alle Technologien beherrscht und auch anbietet. Andererseits erweisen sich die Antriebskomponenten unterschiedlicher Hersteller bei Integration in ein Gesamtsystem oftmals als teil- oder gar inkompatibel.

Unabhängig von diesen organisatorischen Herausforderungen können die verfügbaren Antriebstechnologien entsprechend ihrer Eigenschaften zu einer optimalen, ganzheitlichen Antriebslösung zusammengeführt werden. Beispiele für die Kombination unterschiedlicher Technologien sind elektrohydraulische Hubwerksregelungen, Servolenkungen, oder elektropneumatische Ventile. Die charakteristischen Einsatzbereiche der einzelnen Technologien klassifizieren sich wie folgt:

- Hydraulisch unterstützte Antriebskonzepte kommen dank ihrer hohen Leistungsdichte für hohe Stellkräfte insbesondere bei langen Hubwegen zum Einsatz [28].
- Pneumatik wird typischerweise bei reinen Positionieraufgaben eingesetzt. In diesem Fall ist die Start- und Endposition maßgeblich und ausreichend, nicht aber die Bahn zwischen diesen Positionen.

- Elektrische Antriebstechnik kommt am besten bei klassischer Motion-Control zur Geltung. Dank ihrer Regelgüte können Bahnvorgaben mit hoher Genauigkeit realisiert werden [25].

### 2.2.2. Anwendungen und deren Abstraktion

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden industrielle Anwendungen unabhängig von ihrer konkret implementierten Antriebstechnologie betrachtet. Zu diesem Zweck werden im folgenden die in der Fertigungsautomatisierung einschlägigen Abstraktionen für Geräte und industrielle Anwendungen eingeführt.

#### 2.2.2.1. Geräte und deren Beschreibung

Allgemein umfasst der Begriff *Gerät* jede Komponente, die auf der Feldebene zum Einsatz kommt, beispielsweise Steuerungen oder Antriebe. Um Geräte formal spezifizieren zu können, haben sich sogenannte Gerätebeschreibungssprachen etabliert. Betrachtet man die Beschreibung von Geräten unter dem Blickwinkel der Objektorientierung, so stellt ein Gerät eine Instanz einer *Geräteklasse* dar, die mittels einer Gerätesprache beschrieben wird.

Von den Gerätebeschreibungssprachen sind das Field Device Tool (FDT) nach IEC 62453 [29] und die Electronic Device Description Language (EDDL) nach IEC 61804-3 [30] die prominentesten Vertreter. Aufbauend auf FDT und EDDL soll mit dem Field Device Integration (FDI)-Standard ein weiterer Schritt zur Vereinheitlichung gegangen und über die Anbindung mit der Open Platform Communications Unified Architecture (OPC-UA) [31] eine höhere Durchdringung am Markt erzielt werden [32].

Neben den Bestrebungen, Beschreibungssprachen zu vereinheitlichen bleibt ferner zu konstatieren, dass Nutzerorganisationen und Hersteller nach wie vor herstellerspezifische Methoden verwenden, um ihre Geräte zu beschreiben. So werden PROFIBUS-Geräte typischerweise mit der Generic Station Description (GSD) durch die Generic Station Description Markup Language (GSDML), CANopen- oder DeviceNet-basierte Geräte über das Electronic Datasheet (EDS) und SERCOS-Geräte über die SERCOS Device Description Markup Language (SDDML) beschrieben.

#### 2.2.2.2. Funktionsspezifische Abstraktion

Neben den allgemeinen Parametern eines Gerätes wie seiner Bezeichnung oder Seriennummer, bietet die Geräteklasse eines Gerätes mitunter eine Vielzahl von Funktionalitäten. Sogenannte *Applikationsprofile* spezifizieren einzelne bzw. eine ausgewählte Menge dieser Funktionalitäten eines Gerätes. Im folgenden sollen zwei Beispiele verdeutlichen, wie Applikationsprofile zum einen in Standards verankert sind, zum anderen wie sie als Profil-Struktur zur Modellierung auf einem bestimmten Gerät eingesetzt werden.

##### Beispiel: Antriebsprofil gemäß IEC 61800-7

Applikationsprofile werden typischerweise als IEC-Norm standardisiert, was in Abbildung 2.3 am Beispiel des Antriebsprofils gemäß IEC 61800-7 veranschaulicht wird. Zunächst beschreibt die Norm IEC 61800-7-1 [33] die allgemeine Schnittstellendefinition für Antriebsgeräte. In IEC 61800-7-2 [34] wird ein generisches Antriebsprofil definiert, das als Grundlage einer konkreten

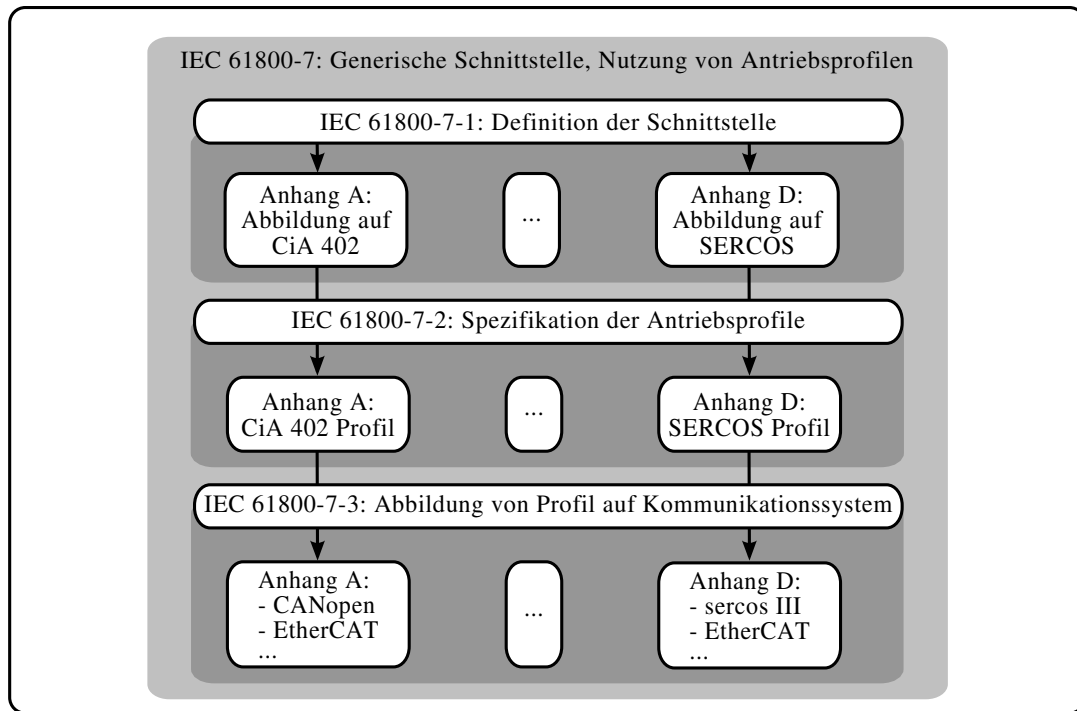


Abbildung 2.3.: Veranschaulichung der Antriebsprofile gemäß IEC-61800-7 [33] [34].

Implementierung aber ungenügend ist. Daher wird über die jeweiligen Anhänge des genannten Standards das konkrete Antriebsprofil spezifiziert. Beispielsweise führt Annex-A der Norm IEC 61800-7-2 das CAN in Automation (CiA)-Antriebsprofil [35] aus, Annex-D das SERCOS-Antriebsprofil [36].

Im weiteren wird die Applikation mit dem Kommunikationssystem dadurch verzahnt, dass das Applikationsprofil nach IEC 61800-7-2 durch die weiterführende Norm IEC 61800-7-3 auf ein dediziertes industrielles Kommunikationssystem abgebildet wird. Beispielsweise wird wie in Abbildung 2.3 veranschaulicht das SERCOS-Antriebsprofil [36] durch die Norm IEC 61800-7-3 Annex-D [37] auf ein Kommunikationssystem abgebildet. Damit kann jeder Anwender das für seine Anwendung passende Paket aus Applikationsprofil und Kommunikationssystem auswählen.

Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass die Vorgehensweise bei der Standardisierung für Antriebsprofile von (a) allgemeiner Schnittstelle, über (b) allgemeines Applikationsprofil, zu (c) speziellem Applikationsprofil als Blaupause für die Standardisierung industrieller Kommunikationsprotokolle zu sehen ist. In der technischen Bestandsaufnahme industrieller Kommunikationssysteme (siehe Abschnitt 3.1) wird dieser Umstand noch verdeutlicht.

### Beispiel: Profil-Struktur von SERCOS

Im vorherigen Beispiel wurde die Vorgehensweise zur Integration eines konkreten Antriebsprofils in die allgemeine Norm für Antriebsprofile beschrieben. Mit Abbildung 2.4 wird nun am Beispiel des SERCOS-Applikationsprofils die Profil-Struktur eines Feldgerätes veranschaulicht.

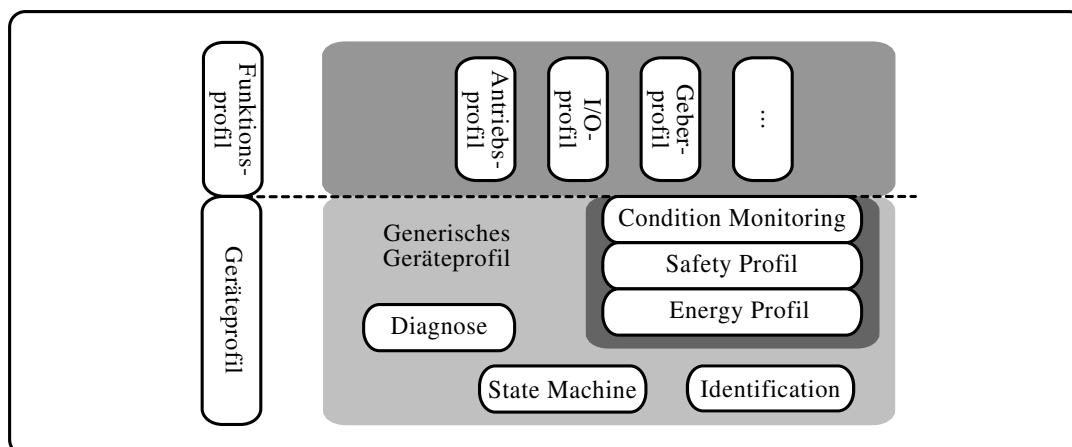


Abbildung 2.4.: Profilstruktur und deren Abbildung für SERCOS [5].

Über das Generic Device Profile (GDP) werden allgemeine Basisfunktionalitäten eines Gerätes beschrieben. Hierzu zählen Services wie Identifikation und Diagnose. Die einem konkreten Gerät bzw. einer Gerätekategorie typischen funktionalen Eigenschaften werden mit sogenannten Function Specific Profile (FSP) spezifiziert. Zu unterscheiden ist zwischen den funktionsbezogenen Profilen, beispielsweise dem bereits referenzierten SERCOS-Antriebsprofil [36] und den darüber hinaus gehenden Querschnittsfunktionen, wie beispielsweise dem SERCOS-Safety Profile, die unabhängig voneinander konfiguriert werden können.

Ausgehend von den bislang diskutierten Applikationsprofilen für die Feldebene werden im nachfolgenden Abschnitt 2.3 die Auswirkungen auf industrielle Kommunikationssysteme in Form der resultierenden Anforderungen betrachtet.

## 2.3. Anforderungen an industrielle Kommunikationssysteme

Dieser Abschnitt stellt den Kern der Anforderungsanalyse dar, in dem die charakteristischen Anforderungsprofile industrieller Anwendungen der Fertigungsautomatisierung für ein zugrunde liegendes Kommunikationssystem herausgearbeitet werden.

Zur Veranschaulichung stellt Abbildung 2.5 schematisch das grundlegende Systemmodell einer industriellen Anwendung dar. Das Anforderungsprofil kann demnach genutzt werden, um die Schnittstelle zwischen Anwendung und Kommunikation zu beschreiben. In Abschnitt 5.2 wird das Schichtenmodell der industriellen Kommunikation eingeführt, in dem die hier angedeutete Schnittstelle zwischen Anwendungs- und Kommunikationsschicht sowie die logischen und physikalischen Verbindungen zwischen den entsprechenden Entitäten detaillierter beschrieben werden.

Ein Anforderungsprofil besteht aus einer Reihe von Kenngrößen, die im folgenden definiert werden. Hierzu werden in Abschnitt 2.3.1 unter dem Blickwinkel der Quality of Service (QoS) zunächst allgemeine Kenngrößen eines Kommunikationssystems diskutiert. Nach der detaillierten Ausarbeitung der einzelnen Kenngrößen werden diese in Abschnitt 2.3.2 als kompakte Anforderungsprofile auf die charakteristischen Anwendungen der Feldebene abgebildet. In Ab-

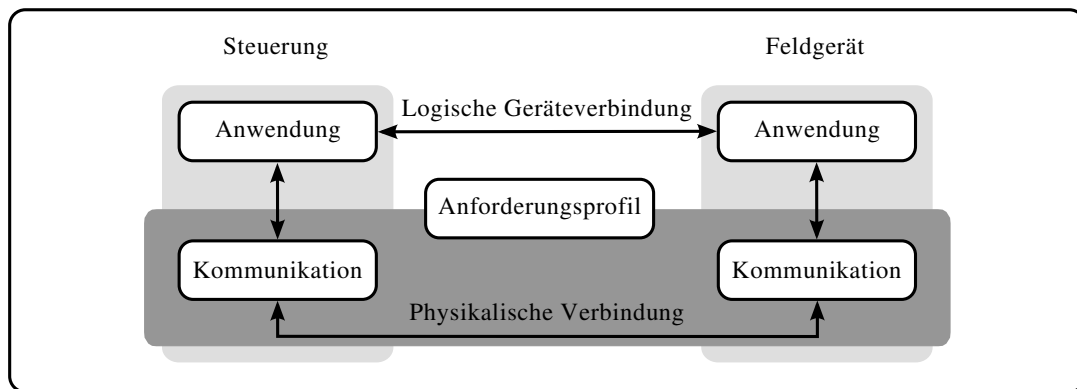


Abbildung 2.5.: Vereinfachtes Systemmodell mit Anforderungsprofil.

schnitt 2.3.3 werden anschließend die Spezifika der funkbasierten Kenngrößen herausgearbeitet und ihr Einfluss auf die Anforderungsprofile bestimmt.

### 2.3.1. Kenngrößen und Dienstgüte

Für QoS finden sich unterschiedliche Begriffsdefinitionen gemäß International Telecommunication Union (ITU), Internet Engineering Task Force (IETF) oder anderen. Im Kontext dieser Arbeit soll unter der QoS gemeinhin die Güte eines Kommunikationssystems gegenüber seinem Anwender verstanden werden. Genauer stellt das Kommunikationssystem als Service Provider einen Dienst (Service) zur Verfügung (siehe Abschnitt 5.1). Kann eine industrielle Anwendung samt ihres Anforderungsprofils über den Service des Kommunikationssystems uneingeschränkt realisiert werden, so ist die QoS des Kommunikationssystems ausreichend. Zur QoS tragen die folgenden aufgeführten Kenngrößen im Einzelnen bei:

#### 2.3.1.1. Knotenzahl

Die Knotenzahl beschreibt die Anzahl der Netzknoten, die über ein industrielles Kommunikationssystem miteinander verbunden sind. Alle Geräte einer Anwendung stellen einen Netzknoten dar.

Eine industrielle Anwendung mit einer Steuerung und  $N$  verbundenen Feldgeräten besteht damit aus  $N + 1$  Netzknoten. Diese Feldgeräte sind entweder Sensoren, Aktoren oder Antriebe, die beides darstellen können. Zudem können Feldgeräte wie in Abbildung 2.2 dargestellt unterschiedliche Technologien realisieren.

#### 2.3.1.2. Reaktionszeit und Übertragungslatenz – Zeitliche Schranken

Kern einer industriellen Anwendung der Feldebene ist der Regelungsalgorithmus, den eine Steuerung als Teil des Regelkreises ausführt. Pro Regelungstakt nimmt die Steuerung dafür Mess- beziehungsweise Istwert ihrer Sensoren – beispielsweise die Messwerte ihrer antriebsintegrierten Geber – entgegen und übergibt Sollwerte an ihre Aktoren. Abbildung 2.6a stellt diesen Datenfluss einer industriellen Anwendung und ihres Kommunikationssystems schematisch für einen Regelungstakt, eine Steuerung und ein (Antriebs-)Feldgerät  $n$  dar.

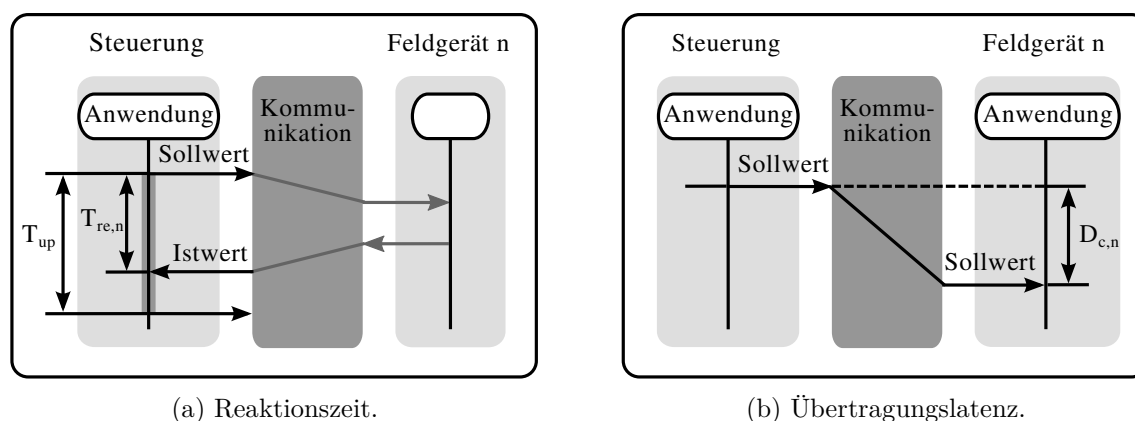


Abbildung 2.6.: Zeitliche Kenngrößen eines industriellen Kommunikationssystems.

Der Regelungstakt läuft periodisch mit der Aktualisierungszeit  $T_{up}$ . Gemäß Vereinbarung überträgt die Steuerung zu Beginn des Regelungstakts Sollwerte an das Feldgerät. Die Reaktionszeit  $T_{re,n}$  definiert schließlich aus Sicht der Steuerung, zu welchem Zeitpunkt die Steuerung Istwerte eines Feldgerätes  $n$  empfangen muss bezogen auf den Zeitpunkt, zu dem die Steuerung Sollwerte an Gerät  $n$  sendet.

Neben der Reaktionszeit stellt die Übertragungslatenz  $D_{x,n}$  eine zweite zeitliche Kenngröße dar. Abbildung 2.6b veranschaulicht die Übertragungslatenz  $D_{c,n}$ , die bei Übertragung von Sollwerten (Command Values) von der Steuerung zu Antriebsgerät  $n$  über das Kommunikationssystem entsteht. Entsprechend beschreibt  $D_{a,n}$  die Übertragungslatenz bei der Übertragung von Istwerten (Actual Values) von Gerät  $n$  zur Steuerung.

Offensichtlich hängt die Reaktionszeit von der Übertragungslatenz ab. Dieser Zusammenhang wird im Kontext der Parametermodellierung und Echtzeitklassifizierung in Abschnitt 5.4.3.1 systematisch betrachtet.

### 2.3.1.3. Jitter – Zeitlicher Versatz

Neben Übertragungslatenz und Reaktionszeit stellt der zeitliche Versatz – der Jitter – eine weitere zeitliche Kenngröße dar. Im Gegensatz zur Übertragungslatenz, die mit der Einhaltung zeitlicher Schranken einhergeht, drückt der Jitter vielmehr aus, mit welcher Genauigkeit zeitliche Abläufe einer Regelschleife ausgeführt werden können. Hierbei sind zwei Ausprägungen des Jitters zu unterscheiden:

1. *Versatz zwischen Geräten pro Regelungstakt:* In einer Anwendung mit  $N$  Feldgeräten sind innerhalb eines Regelungstaktes  $k$  die Sollwerte (oder Istwerte) zeitgleich in allen  $N$  Geräten anzuwenden (oder auszulesen).
2. *Versatz zwischen Regelungstakten pro Gerät:* In einer Anwendung soll jedes einzelne Feldgerät  $n$  seine Sollwerte (oder Istwerte) in aufeinanderfolgenden Regelungstakten  $k, k+1, \dots$  zeitgleich ausführen, das heißt zu einem festgelegten Zeitpunkt bezogen auf den Regelungstakt.

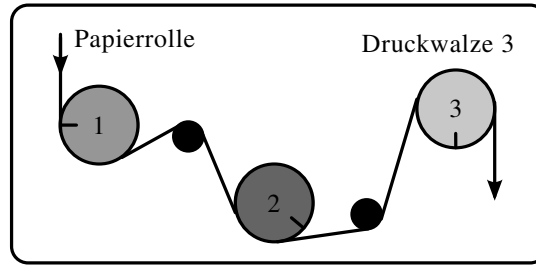


Abbildung 2.7.: Beispielbetrachtung zum Jitter bei einer Druckmaschine.

Der Jitter  $\gamma$  definiert schließlich ein Maß für den zeitlichen Versatz bezüglich der beschriebenen, idealen Zeitpunkte. In Abschnitt 5.4.2 wird ein Parametermodell zur analytischen Berechnung des Jitters erarbeitet.

#### Beispiel: Auswirkung von Jitter bei Druckmaschine

Zur Veranschaulichung des Jitters  $\gamma$  zwischen Feldgeräten pro Regelungstakt stellt Abbildung 2.7 den vereinfachten Aufbau einer Druckmaschine dar. Zum Auftragen unterschiedlicher Farben wird eine fortlaufende Papierrolle über mehrere Druckwalzen geführt. Jede der Druckwalzen bedruckt die Rolle mit einer Farbe. Dabei werden die Druckwalzen durch eine Motion-Control-Anwendung mit elektrischen Antrieben bewegt. Die Antriebe der Druckwalzen werden dabei über eine zentrale Steuerung hinsichtlich ihrer Lage und Geschwindigkeit geregelt.

Zielvorgabe der Anwendung ist es nun, ein für das menschliche Auge homogenes Druckbild zu erzeugen. Hierzu kommt näherungsweise die Heuristik zum Tragen, dass das menschliche Auge Überschneidungen und Lücken zwischen Farbübergängen in der Größenordnung  $< 0,1 \text{ mm}$  nicht mehr auflösen kann. Ferner gilt die Nebenbedingung, die Papierrolle mit einer bestimmten Geschwindigkeit über die Druckwalzen zu führen. Dies ist wie beim Zeitungsdruck aufgrund des kurzen Zeitfensters für die Erstellung ein wirtschaftlich kritischer Parameter. Unter Annahme einer idealen Regelung kann der maximal tolerierbare Versatz berechnet werden mit  $\gamma = [\text{max. Versatz}] / [\text{Rollengeschwindigkeit}]$ . Für eine typische Rollengeschwindigkeit von  $15 \text{ ms}^{-1}$  ergibt sich somit die Anforderung an den Jitter  $\gamma < 6,7 \mu\text{s}$ .

#### 2.3.1.4. Datenrate – Bedarf an Systemkapazität

Neben den zeitlichen Kenngrößen muss ein industrielles Kommunikationssystem gewährleisten können, dass die Menge aller Nutzdaten übertragen werden kann. Bei Antriebsregelungen werden pro Regelungstakt Soll- und Istwerte von der Steuerung zu den Antrieben und umgekehrt ausgetauscht. Daraus ergibt sich pro Gerät  $n$  ein Datenratenbedarf  $r_{c,n}$  für die Sollwert- und  $r_{a,n}$  für die Istwertübertragung. In Summe resultiert daraus ein Gesamtdatenratenbedarf der Anwendung von

$$R_{app} = \sum_{n=1}^N (r_{c,n} + r_{a,n}). \quad (2.1)$$

Hier wird ausschließlich die für die Feldebene typische zyklische Datenkommunikation (siehe Abschnitt 5.3.2) betrachtet. Etwaige zusätzliche, sporadische Kommunikation erhöht den Datenratenbedarf  $R_{app}$  weiter, wird im Kontext dieser Arbeit allerdings nur als Randbedingung (siehe Abschnitt 2.4) betrachtet.

Tabelle 2.1.: Überblick zu Kenngrößen der Anforderungsprofile.

Kenngröße	Akronym	Beschreibung	Modellbildung
Knotenzahl	$N$	Abschnitt 2.3.1.1	-
Übertragungslatenz	$D_{x,n}$	Abschnitt 2.3.1.2	Abschnitt 5.4.1
Jitter	$\gamma$	Abschnitt 2.3.1.3	Abschnitt 5.4.2
Datenratenbedarf	$r_{x,n}$	Abschnitt 2.3.1.4	Abschnitt 7.1.1.1
Paketverlustrate	$PLR$	Abschnitt 2.3.1.5	Abschnitt 5.4.4.1
Aktualisierungszeit	$T_{up}$	Abschnitt 2.3.1.2	-

### 2.3.1.5. Paketverlustrate – Maß der Zuverlässigkeit

Maß für die Zuverlässigkeit und Robustheit der Funkübertragung ist die Paketverlustrate  $PLR$ , die auf der Schnittstelle zwischen Kommunikations- und Anwendungsschicht definiert ist. Als Anforderung für funkbasierte Verfahren in der Fertigungsautomatisierung wird typischerweise ein Wert von  $PLR = 10^{-9}$  genannt [38] [39]. Dieser Wert leitet sich von einer einfachen Betrachtung zu kurzzeitigen Maschinenausfällen ab, deren Anforderung so definiert ist, dass eine Maschine mit einer Funkübertragung pro Regelungstakt  $T_{up} = 10$  ms einen Ausfall pro Jahr tolerieren kann.

In Abhängigkeit von der konkreten industriellen Anwendung ist neben der  $PLR$  mitunter ein zweites Kriterium von Bedeutung. So können Maschinen, beispielsweise in der Antriebstechnik, durchaus eine höhere mittlere Verlustrate tolerieren, sofern die verlorenen Pakete nicht als Bündelfehler auftreten. Das hier zugrunde liegende Fehlermodell wird in Abschnitt 5.4.4 im Kontext der Parametermodellierung ausführlicher betrachtet. Zum Zweck der Vergleichbarkeit wird weiterhin auch die  $PLR$  als Maß der Zuverlässigkeit herangezogen.

## 2.3.2. Anforderungsprofile der Feldebene

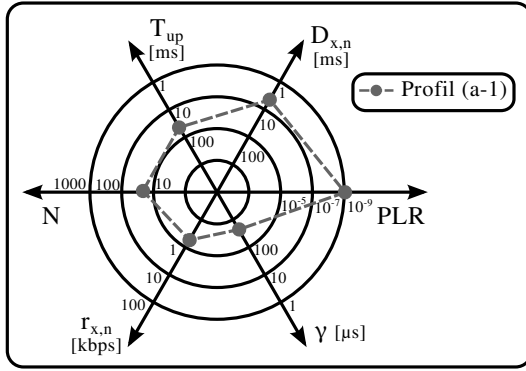
Die im vorherigen Abschnitt 2.3.1 definierten Kenngrößen werden nun zu ganzheitlichen Parametersätzen geformt. Die konkrete Realisierung eines solchen Parametersatzes wird als *Anforderungsprofil* der industriellen Anwendung bezeichnet. Im folgenden werden die für die Feldebene der Fertigungsautomatisierung typischen Anforderungsprofile diskutiert.

### 2.3.2.1. Vorbetrachtungen

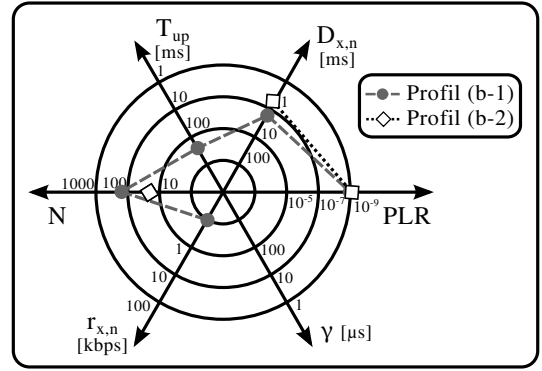
Die Anforderungsprofile werden in Form von Spinnendiagrammen veranschaulicht, die die Kenngrößen Knotenzahl  $N$ , Datenratenbedarf  $r_{x,n}$ , Jitter  $\gamma$ , Paketverlustrate  $PLR$  und Übertragungslatenz  $D_{x,n}$  beinhalten [40]. Die Spinnendiagramme zeichnen sich dadurch aus, dass die Anforderungen entlang der Achsen nach außen hin schwieriger werden. Für den Datenratenbedarf  $r_{x,n}$  und die Übertragungslatenz  $D_{x,n}$  wird mit dem Index  $x$  explizit hervorgehoben, dass eine Kenngröße für beide Übertragungsrichtungen betrachtet wird – für die Sollwertübertragung ( $x \rightarrow c$ ) als auch für die Istwertübertragung ( $x \rightarrow a$ ).

Neben den Kenngrößen, die konkrete Anforderungen an das Kommunikationssystem formulieren, wird mit der Aktualisierungszeit  $T_{up}$  eine Kenngröße der Anwendungsschicht erfasst.





(a) Profiltyp (a): Fertigungszelle [38].



(b) Profiltyp (b): Sensor-Aktor-Netzwerke nach Profil (b-1) [39] und Profil (b-2) [42] [43].

Abbildung 2.8.: Anforderungsprofile für die Profiltypen *Fertigungszelle* und *Sensor-Aktor-Netzwerk* gemäß der Kenngrößen aus Tabelle 2.1.

Zusammen mit der Übertragungslatenz  $D_{x,n}$  lässt sich so auf das Tastverhältnis (Duty Cycle) eines potenziellen Funksystems rückschließen. Das Tastverhältnis umschreibt diejenige Zeitdauer, für die ein Funksystem die Ressourcen des Übertragungsmediums belegt. Tabelle 2.1 fasst schließlich alle Kenngrößen, die Referenzen zu ihren Beschreibungen und zu ihren Parametermodellen zusammen.

### 2.3.2.2. Profiltyp (a): Fertigungszelle

Abbildung 2.8a stellt die Anforderungen für den Profiltyp (a) *Fertigungszelle* gemäß European Telecommunications Standards Institute (ETSI) Technical Report (TR) 102 889-2 [38] dar. Dieser Profiltyp adressiert keine spezielle Anwendungsklasse als vielmehr eine Sammlung gemittelter Anforderungen für alle Anwendungen der Feldebene der Fertigungsautomatisierung. Dies erfolgt in Abgrenzung zu den Anforderungen für die höheren Hierarchieebenen der Fertigungsautomatisierung – der *Fabrikhalle* und der *Werksebene* [38]. Ferner stellt der Profiltyp (a) eine Verfeinerung gegenüber der VDE/VDI-Richtlinie 2185 [41] dar, die die allgemeinen Anforderungen der Fertigungsautomatisierung über alle Hierarchieebenen hinweg betrachtet.

Charakteristisch für Profiltyp (a) ist ein niedriger Datenratenbedarf  $r_{x,n} < 1$  kbps pro Feldgerät und Übertragungsrichtung, der zuvorderst aus einer hohen Aktualisierungszeit  $T_{up} = 50$  ms resultiert. Für den gesamten Datenratenbedarf  $R_{app}$  an das Kommunikationssystem ergibt sich nach Gleichung (2.1) somit  $R_{app} < 40$  kbps. Bezieht man die geforderte Übertragungslatenz  $D_{x,n} = 5$  ms pro Übertragungsrichtung auf die Aktualisierungszeit  $T_{up}$ , so ergibt sich ein Tastverhältnis von  $2 \cdot D_{x,n} / T_{up} = 20\%$ , mit dem ein zugehöriges Funksystem das Übertragungsmedium belastet. Schließlich definiert Profiltyp (a) mit  $\gamma = 0.5$  ms moderate Anforderungen an den Jitter, insbesondere im Vergleich zu den Anforderungen von Motion-Anwendungen des Profiltyps (c).

### 2.3.2.3. Profiltyp (b): Sensor-Aktor-Netzwerke

Der Profiltyp (b) repräsentiert die charakteristischen Anforderungen sogenannter *Sensor-Aktor-Netzwerke*. Abbildung 2.8b veranschaulicht dazu zwei Ausführungen dieses Profiltyps. Demnach zeichnen sich Sensor-Aktor-Netzwerke durch die Übertragung kleiner Datenmengen aus, was sich in einem geringen Datenratenbedarf  $r_{x,n} < 1$  kbps pro Gerät widerspiegelt.

Das Profil (b-1) aus Abbildung 2.8b fasst diejenigen Anforderungen zusammen, die als Ausgangspunkt für die Entwicklung des funkbasierten, proprietären Funksystems Wireless Interface for Sensors and Actuators (WISA) [39] (siehe Abschnitt 3.3.3.1) dienen. Hervorzuheben ist die Unterstützung für bis zu  $N = 120$  funkverbundener Knoten, die seitens der Sensor-Aktor-Anwendung alle  $T_{up} = 200$  ms Nutzdaten austauschen.

Das Profil (b-2) orientiert sich an der IEC-Norm des AS-Interface [44], das als Feldbus-Norm für drahtgebundene Sensor-Aktor-Anwendungen entwickelt wurde und überwiegend zur Übertragung von binären Ein- und Ausgängen genutzt wird. Für dieses Profil ist keine explizite Angabe zur Aktualisierungszeit  $T_{up}$  auf Anwendungsebene verfügbar, vielmehr spezifiziert die Norm eine maximale Buszykluszeit von  $T_{cyc} = 5$  ms, in der jeder Netzknoten einmaligen Zugriff auf das Übertragungsmedium hat. Im Kontext des Modells der zyklischen Kommunikation wird die Beziehung von anwendungsbezogener Aktualisierungszeit  $T_{up}$  und kommunikationsbezogener Zykluszeit  $T_{cyc}$  eingehend diskutiert (siehe Abschnitt 5.3.2).

Die Anforderungen des Profils (b-2) bilden die Grundlage für weitere proprietäre Funksysteme, zum einen für das Funksystem Wireless Sensor/Actuator Network (WSAN) [42] (siehe Abschnitt 3.3.3.2), zum anderen für ein Impulse Radio Ultra-Wideband (IR-UWB)-basiertes Verfahren [43] (siehe Abschnitt 3.3.3.3).

Im Gegensatz zu den Profiltypen (a) und (c) spezifizieren Sensor-Aktor-Netzwerke keine expliziten Anforderungen zum zeitlichen Versatz. Seitens der Anwendung ist typischerweise keine genauere zeitliche Auflösung vonnöten, sodass es genügt, wenn das Kommunikationssystem die Nutzdaten innerhalb der Zykluszeit  $T_{cyc}$  vom Sender zum Empfänger übertragen kann. Implizit ist der zeitliche Versatz damit auf die Größenordnung der Zykluszeit begrenzt, was gemäß der späteren Modellbildung der Klasse grob synchronisierter Sub-Systeme zuzuordnen ist (siehe Abschnitt 5.4.2.3).

### 2.3.2.4. Profiltyp (c): Motion-Control-basierte Anwendungen

Der Profiltyp (c) in Abbildung 2.9 umschreibt die Anforderungen *Motion-Control*-basierter Anwendungen. Im Gegensatz zu Sensor-Aktor-Anwendungen, bei denen binäre Nutzdaten von Ein- und Ausgängen übertragen werden, fallen bei Motion-Anwendungen pro Feldgerät eine Reihe verschiedener Soll- und Istwerte pro Regelungstakt an, die zwischen Gebern, Antrieben und der Steuerung ausgetauscht werden.

Ferner liegt die Aktualisierungszeit  $T_{up}$ , die bei Motion-Anwendungen dem Regelungstakt der Steuerung entspricht, in der Größenordnung der Übertragungslatenz  $D_{x,n}$  – also im Bereich weniger Millisekunden. In Folge steigt zum einen das Tastverhältnis  $D_{x,n} / T_{up}$ , was in einer höheren Auslastung des Übertragungsmediums resultiert. Zum anderen wächst der Datenratenbedarf  $r_{x,n}$  pro Feldgerät und damit der Gesamtdatenratenbedarf auf typischerweise

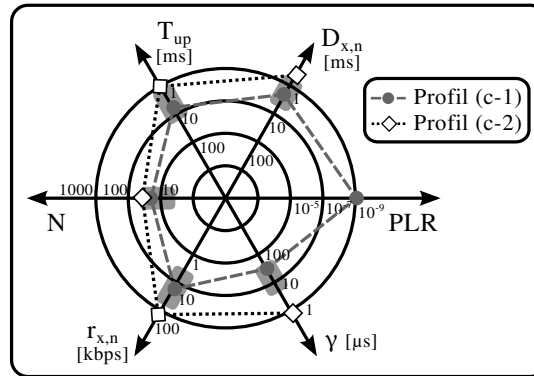


Abbildung 2.9.: Anforderungsprofile Motion-Control-basierter Anwendungen: Profil (c-1) Verpackungsmaschine [45], Profil (c-2) Industrial Ethernet Referenz [32].

$R_{app} > 1$  Mbps. Neben den zeitlichen Schranken bestehen weiterhin Anforderungen an den zeitlichen Versatz – den Jitter  $\gamma$ , der typischerweise im Bereich weniger Mikrosekunden liegt [45].

Das Profil (c-1) in Abbildung 2.9 umschreibt die Anforderungen einer Verpackungsmaschine als Beispiel für typische Motion-Control-basierte Anwendungen [45]. Die Aktualisierungszeit  $T_{up}$  als auch Übertragungszeiten  $D_{x,n}$  liegen für diese konkrete Anwendung in der Größenordnung weniger Millisekunden, der Jitter  $\gamma$  im Bereich weniger Mikrosekunden. Neben dem Profil (c-1) gibt Abbildung 2.9 weiterhin für jede Kenngröße einen typischen Arbeitsbereich an, in dem sich weitere Motion-Control-basierte Anwendungen wie Werkzeug-, Abfüll- oder Druckmaschinen einordnen lassen.

Losgelöst von konkreten Anwendungen veranschaulicht das Profil (c-2) als Referenz die Leistungsfähigkeit drahtgebundener Industrial-Ethernet-Systeme, die speziell für Motion-Control-basierte Anwendungen eingesetzt werden.

### 2.3.3. Einfluss von Mobilität

Neben den bislang diskutierten Kenngrößen kommt durch den Einsatz von Funktechnologie mit der *Mobilität* eine zusätzliche Einflussgröße für ein Kommunikationssystem hinzu. Dabei ist weniger interessant, in wie weit die Datenübertragung durch Mobilität in Form von Mehrwegeausbreitung und Dopplereffekt beeinflusst wird, als vielmehr der Umstand, ob und wie sich Funkteilnehmer eines Funksystems überhaupt in Relation zueinander bewegen und welche Konsequenzen daraus für die Architektur eines Funksystems abgeleitet werden können.

Eine wichtige Kenngröße der Mobilität ist daher die Art, wie sich Funkteilnehmer eines Funksystems zueinander bewegen. Im allgemeinen Fall und ohne Einschränkung bewegen sich Funkteilnehmer frei innerhalb der Reichweite eines Funksystems. In zellular organisierten Systemen schaffen Mechanismen wie Handover-Prozeduren die Voraussetzung, dass ein Funkteilnehmer sich frei zwischen Basisstationen bewegen kann. Im Falle von vermaschten Topologien (siehe Abschnitt 5.3.1) werden dazu Nachbarschaftstabellen aktualisiert und gegebenenfalls neue Routen in einem Mesh-Netzwerk bestimmt.

Im Gegensatz zu dieser freien Art der Bewegung bewegen sich die Feldgeräte industrieller

Tabelle 2.2.: Anforderungsprofile unter Berücksichtigung von Mobilität.

Profil	$N$	$N'$	$\frac{N}{N'} \cdot r_{x,n}$ [kbps]	$\gamma$ [μs]	$D_{x,n}$ [ms]	$T_{up}$ [ms]	Referenz
(a-1)	30	2 ... 30	9,6 ... 0,64	500	5	50	ETSI TR 102 889-2 [38]
(b-1)	120	2 ... 120	6,0 ... 0,1	-	15	200	WISA [39]
(b-2)	62	2 ... 62	-	-	5	-	WSAN [46]
	32	2 ... 32	-	-	20	-	IR-UWB [43]
(c-1)	30	2 ... 30	360 ... 24	20	2,5	5	Verpackungsmaschine [45]
(c-2)	100	-	4000	1	0,5	1	Industrial-Ethernet Referenz

Maschinen auf Feldebene der Fertigungsautomatisierung typischerweise auf vordefinierten Bahnen. Darüber hinaus befinden sich mitnichten alle Geräte einer Anwendung auf eigenen mobilen Maschinenteilen. Vielmehr sind häufig nur wenige Verbindungselemente nötig, um die Gerätegruppe eines beweglichen Maschinenteils mit der Steuerung oder einem anderen fest installierten Maschinenteil zu koppeln. Gruppiert man die Feldgeräte eines bestimmten Maschinenteils  $n'$  zu einem Sub-System, so kann jedes Feldgerät  $n_{n'}$  mit seiner Kennung  $n$  innerhalb des Sub-Systems  $n'$  eindeutig identifiziert werden. Mit der Anzahl  $N_{n'}$  der Geräte pro Sub-System  $n'$  und der gesamten Anzahl  $N'$  an Sub-Systemen gilt dann für die Gesamtzahl  $N$  der Anwendung entsprechend

$$N = \sum_{n'=1}^{N'} N_{n'} . \quad (2.2)$$

Eine erste Konsequenz aus der charakteristischen Bewegung von Funkteilnehmern auf vordefinierten Bahnen ist die Möglichkeit einer zugeschnittenen Antennentechnik für Funktechnologie, was vorrangig einer robusteren Datenübertragung dient (siehe Abschnitt 7.2.3.1.2).

Da sich die Feldgeräte eines Sub-Systems relativ zueinander in Ruhe befinden, ergibt sich im weiteren die Möglichkeit, alle  $N_{n'}$  Feldgeräte eines Sub-Systems  $n'$  durch eine drahtgebundene Lösung zu vernetzen. Folglich spiegelt im Umkehrschluss die Anzahl  $N'$  der Sub-Systeme einer Anwendung die Menge der tatsächlich in relativer Bewegung zueinander befindlichen Gerätegruppen wider. Damit kann  $N'$  als Indikator für die Anzahl der tatsächlich benötigten Funkverbindungen interpretiert werden. Mittels dieser Betrachtungsweise werden die Anforderungsprofile dahingehend erweitert, als dass die Anzahl  $N'$  der Sub-Systeme als neuer Freiheitsgrad bei der Auslegung eines Kommunikationssystems berücksichtigt werden kann.

Die Ergebnisse fasst Tabelle 2.2 für die bereits in den vorherigen Abschnitten ausgeführten Profiltypen zusammen. Existiert pro Sub-System nur ein Feldgerät, so gilt für diesen Fall  $N = N'$  und jedes Gerät  $n$ , sprich jeder Funkteilnehmer, überträgt Nutzdaten mit der Datenrate  $r_{x,n}$ . Kann eine Anwendung hingegen aus  $N' = 2$  Sub-Systemen aufgebaut werden, so erhöht sich die Datenrate für die Funkstrecke zwischen den Sub-Systemen auf  $\frac{N}{N'} \cdot r_{x,n}$ , sofern man eine Gleichverteilung von Feldgeräten pro Sub-System annimmt und jedes Feldgerät die gleiche Datenrate  $r_{x,n}$  produziert. In diesem Fall reduziert sich die Anzahl der Funkteilnehmer auf

$N' = 2$ .

## 2.4. Weitere Randbedingungen

Neben den bislang diskutierten Anforderungen und Kenngrößen werden in diesem Abschnitt weitere Randbedingungen benannt. Sie bilden nicht den Kern der Arbeit, werden aber zur Vollständigkeit des Gesamtbildes der Anforderungsanalyse aufgeführt.

### 2.4.1. Adaptivität und sporadische Kommunikation

Die Adaptivität beziehungsweise die dynamische Konfigurierbarkeit eines industriellen Kommunikationssystems auf der Feldebene spielt insbesondere in der aktiven Betriebsphase einer Anwendung eine nachgelagerte Rolle. Der Grund liegt darin, dass vor der Projektierung und Inbetriebnahme einer Anwendung eine intensive Planungs- und Entwurfsphase erfolgt. Bereits zu diesem Zeitpunkt wird vom Maschinenbauer festgelegt, welche Maschinenteile mit welcher Teilfunktionalität zur Gesamtfunktion einer Anwendung beitragen. Sollen zu einem späteren Zeitpunkt Geräte als *Hot-Plug*-Komponenten im aktiven Betriebsmodus hinzugefügt werden, muss dem bereits in der Planungsphase Rechnung getragen werden, denn dort werden die Struktur und das Zeitverhalten von Datenpaketen in der aktiven Betriebsphase ausgelegt.

Im Bezug auf diese quasi-adaptive Auslegung eines industriellen Kommunikationssystems stellt sich die Frage nach der Kompatibilität zu Anwendungsfällen wie Condition Monitoring, die im Kontext von Industrie 4.0 populärer werden. Dies lässt sich damit erklären, dass aktuelle industrielle Kommunikationssysteme die ihnen verfügbare Bandbreite derart aufteilen, dass in der aktiven Betriebsphase jeglicher sporadischer Datenverkehr zusätzlich zur zyklischen Kommunikation gehandhabt werden kann. Das wird dadurch gewährleistet, dass zusätzlich zur zyklischen Kommunikation Bandbreite vorgehalten wird und sporadische Daten als *Best-Effort* behandelt werden. Sporadische Daten stellen demzufolge keine Einschränkungen für die zyklische Kommunikation dar, die als Grundlage für die regelungstechnische Anwendungen der Feldebene unbeeinflusst bleiben muss.

### 2.4.2. Maschinen- und Informationssicherheit

Die Maschinensicherheit im Sinne *funktionaler Sicherheit* einer industriellen Anwendung wird durch die Norm IEC 61508 [2] abgedeckt. Funktionale Sicherheit bedeutet in diesem Kontext, dass jeder Fehler der gesamten Funktionskette einer Anwendung, die typischerweise aus Sensor, drahtgebundenem oder funkbasiertem Kommunikationssystem, Steuerung, Kommunikationssystem und Aktor besteht, erkannt wird und entsprechende Sicherheitsfunktionen zur Abwendung von Gefahren ausgeführt werden. Zu diesem Zweck wird für eine Anwendung das sogenannte Safety Integrity Level (SIL) definiert, das über die gesamte Funktionskette erfüllt sein muss.

Tabelle 2.3 listet die definierten SIL mit den zulässigen Ausfallwahrscheinlichkeiten pro Stunde  $\beta_{SIL,x}$ ,  $x \in \{1, 2, 3, 4\}$  auf. Das Kommunikationssystem wird als Teilsystem der gesamten Funktionskette betrachtet und nach IEC 61508 als *Black Channel* modelliert. Prinzipiell ist auch die Betrachtung als *White Channel* möglich, womit dann das gesamte Übertragungssystem nach den Safety-Normen wie IEC 61508 und IEC 61784-3 entworfen und begutachtet werden müsste. Daher wird überwiegend der Black-Channel-Ansatz gewählt

Tabelle 2.3.: Ausfallwahrscheinlichkeit der Funktionskette  $\beta_{SIL,x}$ ,  $x \in \{1, 2, 3, 4\}$  zur funktionalen Sicherheit nach IEC 61508 [2].

SIL	Ausfallwahrscheinlichkeit pro Stunde
4	$10^{-9} \leq \beta_{SIL,4} < 10^{-8}$
3	$10^{-8} \leq \beta_{SIL,3} < 10^{-7}$
2	$10^{-7} \leq \beta_{SIL,2} < 10^{-6}$
1	$10^{-6} \leq \beta_{SIL,1} < 10^{-5}$

[47]. Damit gilt, dass das Kommunikationssystem als Teilsystem mit 1% zur Ausfallwahrscheinlichkeit der gesamten Funktionskette beitragen darf. Die Maßnahmen zur Sicherstellung dieser Anforderung regelt die Norm IEC 61784-3 [48] zusammen mit expliziten Profilen zur funktionalen Sicherheit wie CIP-Safety nach IEC 61784-3-2 oder PROFIsafe nach IEC 61784-3-3. Folglich bestehen die Aufgaben zur Maschinensicherheit darin, Fehler zu erkennen und Maßnahmen zur Abwendung von Gefahren einzuleiten. Die Güte dieser Fehlererkennung wird durch explizite Safety-Protokolle garantiert. Im Umkehrschluss kann aus den Anforderungen der Maschinensicherheit nicht auf ein Kriterium für die QoS der Datenübertragung für das Kommunikationssystem selbst geschlossen werden. Die Anforderungen an die *PLR* leiten sich demnach ausschließlich von der industriellen Anwendung ab.

Neben der Maschinensicherheit, welche die intern auftretenden Gefahren einer industriellen Anwendung abzuwenden sucht, adressiert die Informationssicherheit, oder *IT-Sicherheit*, diejenigen Gefahrenpotenziale, denen industrielle Anwendungen durch Eingriffe und Manipulation von externer Seite ausgesetzt sind. Auch hier baut auf der Basis-Norm ISO/IEC 27000 [49] eine ganze Standardfamilie auf, die den gesamten IT-Sicherheitsprozess von der Risiko- und Bedrohungsanalyse über die Konzepterstellung bis hin zur kontinuierlichen Feldbeobachtung oder dem Bereitstellen von Maßnahmen im eingetroffenen Schadensfall abdeckt. Begleitend zu den relevanten Standards unterstützen Interessenverbände bei der Sensibilisierung und liefern entsprechende Handlungsanweisungen wie mit der VDE/VDI-Richtlinie 2182 [50].

Im Vergleich zur klassischen Office-IT kristallisiert sich für industrielle Anwendungen eine Verschiebung der Priorisierung bei den klassischen Schutzzielen heraus. Die Verfügbarkeit einer Anlage genießt demnach bei industriellen Anwendungen höchste Priorität, gefolgt von den Schutzzielen der Integrität und der Vertraulichkeit [51]. Ohne die Schutzziele näher auszuarbeiten wird ihnen – insbesondere dem höchsten Schutzziel der Verfügbarkeit – im Rahmen dieser Arbeit durch Berücksichtigung der Anforderungen an die Zuverlässigkeit und an die zeitlichen Schranken der Datenübertragung zumindest Rechnung getragen.

2.4.3. Industrieller Funkkanal und -regulierung

Im Gegensatz zu den einschlägigen Kanalmodellen für Mobilfunksysteme, die zur Entwurfsphase und für Simulationen genutzt werden, stehen für den industriellen Funkkanal keine einschlägigen Kanalmodelle zur Verfügung.

Es finden sich nur wenige Untersuchungen, die den Themenkomplex des industriellen Funkkanals sowohl messtechnisch als auch theoretisch adressieren, um so neue Modelle

ableiten zu können [52] [53] [54]. Wichtige Ergebnisse der verfügbaren Quellen lauten, dass die durch industrielles Schweißen emittierte elektromagnetische Strahlung im Bereich oberhalb von 1 GHz abnimmt und somit die Funkkommunikation im 2,4 GHz ISM-Band nicht stört. Ferner tragen metallische Oberflächen zu einer verstärkten Mehrwegeausbreitung bei, die bei schmalbandigen Systemen ohne Schutzintervall zwischen den Übertragungssymbolen die Zuverlässigkeit der Datenübertragung negativ beeinflusst. Kernaussage bleibt jedoch, dass industrielle Fertigungsstätten sehr individuelle und unterschiedliche Charakteristika für den Übertragungskanal mit sich bringen, für die eine lokale Vermessung der Produktionsstätte empfohlen wird [55].

Ein anderer Ansatz besteht darin, für dedizierte Funksysteme, Arbeitsumgebungen und Fertigungsstätten initiale Referenzmessungen durchzuführen und ausgehend davon mittels der Kohärenzzeit und -bandbreite eine Optimierung des Funksystems durchzuführen, beispielsweise hinsichtlich eines Zeit-Frequenz-Hopping-Verfahrens [46]. Setzt man beispielsweise ein IEEE-802.11-basiertes Funksystem selbst als Messsystem ein, so kann der dedizierte, IEEE-802.11-basierte Funkkanal mittels der Paketverlustrate *PLR* analysiert und das so ermittelte Fehlermodell zur Verbesserung der spezifischen Protokolle des Funksystems genutzt werden [56].

Im Hinblick auf die Funkregulierung ist für die Automatisierungstechnik derzeit – zum Jahre 2020 – kein dediziertes Frequenzband für eine hochratige Datenübertragung frei verfügbar. Als Folge operieren industrielle Funksysteme in den lizenzfreien Spektren der ISM-Bänder bei 2,4 GHz und 5 GHz. Da in diesen Frequenzbereichen bereits viele Funksysteme zum Einsatz kommen, rücken Betrachtungen zur Koexistenz in den Vordergrund, die durch die harmonisierte Norm ETSI EN 300 328 [57] eine verpflichtende Auflage bei der Neuzulassung funkbasierter Funkkomponenten im 2,4 GHz Band sind. Im Kern müssen alle Funkteilnehmer – in Abhängigkeit ihrer Sendeleistung und ihres Tastverhältnisses – faire und adaptive Mechanismen des Medienzugriffs unterstützen, wie dies beispielsweise der Wireless Local Area Network (WLAN)-Funkstandard IEEE 802.11 [58] mit seinem Carrier Sense Multiple Access (CSMA)-Mechanismus bereits tut. Damit stehen diese normativen Anforderungen im Widerspruch zu den Anforderungsprofilen industrieller Anwendungen der Feldebene.

Als Reaktion auf die harmonisierte ETSI-Norm EN 300 328 wurde unter Federführung des Zentralverbands Elektrotechnik- und Elektroindustrie (ZVEI)<sup>7</sup> die Task Force Wireless Regulierung in der Industrieautomation (WiRIA) gegründet. Arbeitsergebnisse dieser Aktivitäten sind Technical Reports wie ETSI TR 102 889-2 [38] oder 3GPP TR 22.804 [59], die die Anforderungen der Automatisierungsindustrie bündeln und hinsichtlich des Bedarfs nach einem Frequenzspektrum analysieren. Als Zielstellung wird eine exklusive Frequenzzuweisung für Funksysteme der Industrieautomatisierung angestrebt. Als Nachfolgegremium hat sich, neuerlich unter dem Dach des ZVEI, die 5G Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA)<sup>8</sup> geformt, welche die Interessen der Automatisierungsindustrie gegenüber den Regulierungsbehörden vertritt – insbesondere, um im Kontext der Frequenzvergabe für den künftigen Funkstandard 5G dedizierte Spektren auch lokal, autonom und unabhängig von den Netzbetreibern nutzen zu können.

Seit Ende 2019 können in Deutschland bei der Bundesnetzagentur 5G-Frequenzen im Bereich

<sup>7</sup>[www.zvei.org](http://www.zvei.org)

<sup>8</sup>[www.5g-acia.org](http://www.5g-acia.org)

von 3,7 GHz bis 3,8 GHz zur privaten Nutzung – beispielsweise auf einem Firmengelände oder in einer Fabrikhalle – beantragt werden. Die Vergabe dieser Lizenzen erfolgt gegen Kosten, ist zeitlich begrenzt und erfordert den Nachweis technischer Kompetenz des Antragsstellers [60]. Für mittelständische Maschinenbauer erscheint dieses Modell zumeist unattraktiv: Vor- dergründig verschwindet zwar die direkte Abhängigkeit von den Mobilfunkprovidern, indirekt hingegen müssen technische Kompetenzen beziehungsweise Telekommunikationsknowhow über andere, externe Anbieter erworben werden, was wiederum zu einer Abhängigkeit und versteckten Kosten führt. In der aktuellen Situation bleiben daher nach wie vor die lizenzfrei nutzbaren Frequenzspektren der ISM-Bänder samt ihrer hinlänglich diskutierten Vor- und Nachteile die bevorzugte Lösung vieler Maschinenbauer.

## 2.5. Zusammenfassung

Der Fokus von Kapitel 2 dieser Arbeit lag auf der Analyse von Anforderungen für industrielle Anwendungen der Feldebene der Fertigungsautomatisierung.

Zu diesem Zweck wurde die Feldebene der Fertigungsautomatisierung zunächst in den Kontext der gesamten Automatisierungstechnik gesetzt und klassifiziert. Als Ergebnis lässt sich die Fertigungsautomatisierung von anderen Automatisierungsbranchen (siehe Abschnitt 2.1.1), wie auch die Feldebene von anderen Hierarchieebenen in der Automatisierungspyramide (siehe Abschnitt 2.1.2) abgrenzen. Basierend auf den physikalischen Wirkmechanismen der Mechanik, Hydraulik, Pneumatik und Elektrik (siehe Abschnitt 2.2.1.2) werden mittels Komponenten wie speicherprogrammierbaren Steuerungen, Antrieben, Gebern und anderen (siehe Abschnitt 2.2.1.1) sowie deren Vernetzung mittels industrieller Kommunikationssysteme industrielle Anwendungen der Feldebene der Fertigungsautomatisierung realisiert.

Ausgehend von diesen Anwendungen lassen sich Anforderungen für ein industrielles Kommunikationssystem ableiten. Dazu wurden mit Übertragungslatenz  $D_{x,n}$ , Reaktionszeit  $T_{re,n}$ , Jitter  $\gamma$ , Datenrate  $r_{x,n}$  und der Paketverlustrate  $PLR$  zunächst die wichtigen Kenngrößen (siehe Abschnitt 2.3.1 und Tabelle 2.1) definiert. Die aus den industriellen Anwendungen resultierenden Anforderungen wurden auf diese Kenngrößen abgebildet und so auf kompakte Weise als Anforderungsprofile (siehe Abschnitt 2.3.2) formuliert. Hier kristallisieren sich mit Profiltyp (b) und Profiltyp (c) zwei charakteristische Anforderungsprofile für die Feldebene der Fertigungsautomatisierung heraus. Dabei zeichnet sich Profiltyp (b) für Sensor-Aktor-Netzwerke durch eine hohe Anzahl von Feldgeräten ( $N > 100$ ) mit geringem Datenratenbedarf pro Feldgerät ( $r_{x,n} < 1$  kbps) aus. Währenddessen ist Profiltyp (c) für Motion-Control-basierte Anwendungen durch zeitliche Anforderungen hinsichtlich seiner zeitlichen Schranken ( $D_{x,n}$  und  $T_{re,n}$  im Bereich weniger Millisekunden) wie auch seines zeitlichen Versatzes (Jitter  $\gamma$  im Bereich weniger Mikrosekunden) geprägt.

Neben diesen, aus den regelungstechnischen Kenngrößen einer Anwendung explizit bestimmbar, Anforderungen zeigt die Bewertung der Mobilität innerhalb einer Maschine (siehe Abschnitt 2.3.3), wie sich implizite Anforderungen auf die Auslegung industrieller Kommunikationssysteme auswirken. So legt die Analyse der Aufbauten von Maschinen nahe, dass sich im Falle mobiler Anwendungsfälle typischerweise nur  $N'$  einzelne Maschinenteile in relativer Bewegung zueinander befinden, während die Feldgeräte eines Maschinenteils in Ruhe zueinander verbleiben. Die Feldgeräte eines Maschinenteils können als Sub-System einer



industriellen Anwendung modelliert werden.

Bei der Auslegung einer industriellen Anwendung wie einer Maschine entsteht damit ein neuer Freiheitsgrad, wenn die funkbasierte Vernetzung nicht zwischen  $N$  einzelnen Feldgeräten sondern zwischen  $N'$  Sub-Systemen erfolgt, wobei die Feldgeräte innerhalb eines Sub-Systems drahtgebunden vernetzt sind. Im Hinblick auf ein Funksystem pflanzt sich dieser Freiheitsgrad dahingehend fort, als dass ein Funksystem potenziell weniger Funkverbindungen ( $N \rightarrow N'$ ) bereitstellen, diese allerdings mit höherer Datenrate ( $r_{x,n} \rightarrow \frac{N}{N'} \cdot r_{x,n}$ ) betreiben können muss (siehe Tabelle 2.2).

Über den Aspekt der Mobilität hinaus lassen sich durch Analyse der Aussagen von Kunden und Nutzern wie Maschinenbauern und -betreibern [6] weitere implizite Anforderungen an ein industrielles Kommunikationssystem ableiten, die als Treiber für weitere Architekturentscheidungen dienen.

- Demnach formuliert ein typischer Anwender seine Aussagen zu den Anforderungen an ein Kommunikationssystem stets aus Sicht seiner gesamten Anwendung, typischerweise seiner Maschine, und weniger hinsichtlich der Kommunikationstechnologie. Das Kommunikationssystem wird als *Black-Box* betrachtet.
- Ein typischer Anwender sieht Funktechnik als neuen Freiheitsgrad und zusätzlichen Baustein für sein bestehendes Kommunikationssystem. Im Umkehrschluss setzt er ein *drahtgebundenes legacy* System voraus, das um funkbasierte Komponenten erweitert wird. Dies resultiert in einem hybriden industriellen Kommunikationssystem.
- Ein typischer Anwender erwartet, dass für ihn der Einsatz von Funktechnologie nicht spürbar ist. Im weiteren Sinne fordert er damit sowohl die *nahtlose Integration* eines funkbasierten Sub-Systems in sein drahtgebundenes legacy System, die *Interoperabilität* der Sub-Systeme untereinander, als auch die *Koexistenz* verschiedenartiger funkbasierter Sub-Systeme.
- Ein typischer Anwender wägt den Einsatz von Funktechnik im Einzelfall ab, wozu Interessenvertreter der Branche raten [55], insbesondere um der Koexistenz von Funksystemen in den frei verfügbaren ISM-Bändern Rechnung zu tragen. Im Kern erwartet der Anwender damit ein *flexibles* und hinsichtlich seiner Sub-Systeme und eingesetzten Technologien frei *konfigurierbares* Kommunikationssystem.

## 3. Wireless Automation - Technische Bestandsaufnahme

In diesem Kapitel erfolgt eine technische Bestandsaufnahme für funkbasierte industrielle Kommunikationssysteme. Dabei werden der Stand der Technik und Forschung referenziert und die Grenzen bezüglich der im Rahmen dieser Arbeit adressierten Anforderungen aufgezeigt. Zu diesem Zweck werden zunächst drahtgebundene Systeme in Abschnitt 3.2 und funkbasierte Systeme in Abschnitt 3.3 einzeln betrachtet, deren Funktionsweisen und Eigenschaften beleuchtet sowie deren Begrenzungen aufgezeigt. Anschließend wird in Abschnitt 3.4 auf die Integration funkbasierter Verfahren in bestehende drahtgebundene Systeme fokussiert, die in ein hybrides industrielles Kommunikationssystem mündet. Eine abschließende Bewertung der Bestandsaufnahme in Abschnitt 3.5 rundet dieses Kapitel ab.

### 3.1. Vorbetrachtungen - Historische Einordnung

Die Entwicklung klassischer Feldbusse ab den frühen 1980er Jahren brachte überwiegend proprietäre und firmenspezifische Lösungen hervor. In den isolierten und wenig vernetzten industriellen Netzwerken einer Fertigungs- oder Produktionsanlage war dieser Ansatz hinreichend. Unter diesen Rahmenbedingungen resultierte der Standardisierungsprozess für Feldbusse in einer Multi-Standard-Lösung IEC 61158 [2]. Der zugehörige Anhang IEC 61784 [3] des Standards listet eine Reihe sogenannter Feldbus-Profile, in denen sich eine Vielzahl firmenspezifischer und von Interessengruppen getriebener Feldbusse wiederfinden [27]. Aufgrund der kontroversen Diskussionen zur Einigung auf einen gemeinsamen Feldbus-Standard erlangte dieser Prozess unter dem martialischen Begriff *Fieldbus War* Bekanntheit [61].

Auf die klassischen Feldbusse folgt mit Industrial Ethernet der nächste Evolutionsschritt für industrielle Kommunikationssysteme, der bis heute den Stand der Technik darstellt. Dabei basiert Industrial Ethernet auf dem Ethernet Standard IEEE 802.3. Durch diesen Ansatz wird zum einen im Vergleich zu bestehenden Feldbussen eine verbesserte Performance hinsichtlich der Datenrate erzielt. Zum anderen kann durch die weite Verbreitung von IEEE-802.3-basierten Komponenten im Heim- und Bürobereich, einhergehend mit hohen Stückzahlen, auf eine bewährte Technik einschließlich kostengünstiger Hardwarekomponenten zurückgegriffen werden. Ähnlich wie bei Feldbussen endete der Standardisierungsprozess für Industrial Ethernet im Jahre 2000 wiederum mit einer Multi-Standard-Lösung in IEC 61158 und zugehörigen Industrial-Ethernet-Profilen in IEC 61784 [27].

### 3.2. Drahtgebundene industrielle Kommunikationssysteme

Die nachfolgenden Betrachtungen fokussieren auf Industrial Ethernet, das gemäß seiner Marktposition den Stand der Technik für drahtgebundene industrielle Kommunikationssysteme repräsentiert [8].

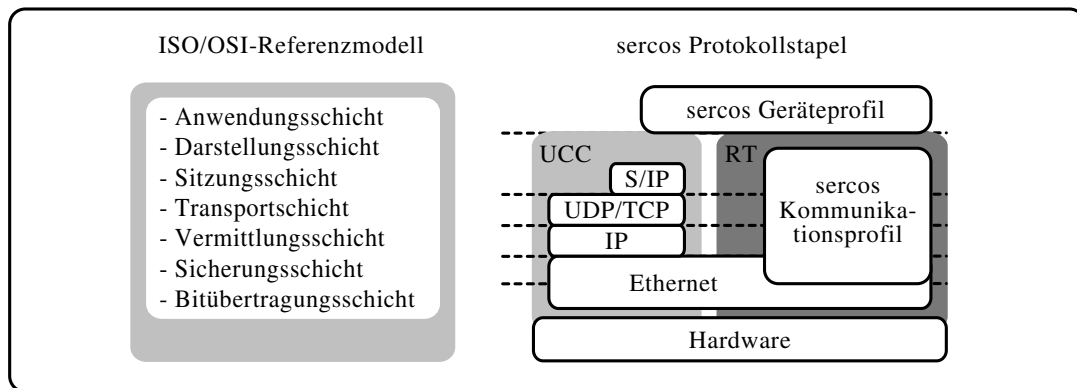


Abbildung 3.1.: Protokollstapel des Industrial-Ethernet-Systems sercos III.

### 3.2.1. Funktionsweise von Industrial-Ethernet

Um die Anforderungen industrieller Anwendung an die QoS eines industriellen Kommunikationssystems – insbesondere die Anforderungen an die zeitlichen Schranken gemäß Abschnitt 2.3.1 – erfüllen zu können, reicht Ethernet nach IEEE 802.3 gepaart mit standardmäßigen TCP/IP oder UDP zumeist nicht aus. Abhängig von dem Einsatzbereich des entsprechenden Industrial-Ethernet-Systems werden unterschiedliche Mechanismen eingesetzt, deren Bandbreite von reinen Software- und Protokollerweiterungen bis hin zu dedizierten Hardwarebausteinen reicht.

#### 3.2.1.1. Protokollstapel von Industrial Ethernet

Abbildung 3.1 zeigt den Protokollstapel des Industrial-Ethernet-Systems sercos III nach IEC 61784-2 [62] und setzt ihn in Bezug zum International Organization for Standardization / Open Systems Interconnect (ISO/OSI)-Referenzmodell. Demgemäß bietet sercos III zwei Ausführungen des Protokollstapels, was charakteristisch für zahlreiche Industrial-Ethernet-Systeme ist. Eine Ausführungsform realisiert die Kompatibilität zu IP-basierten Standardgeräten und Protokollen, die andere Ausführungsform dient zur Erfüllung der domänenspezifischen Anforderungen.

Im konkreten Beispiel bietet sercos III durch den Unified Control Channel (UCC) einen standardkonformen TCP/IP-Stack, der für den Transfer sporadischer Daten zu Diagnosezwecken genutzt wird. Auf diese Weise wird im Sinne eines Cyber-physikalischen Systems die vertikale Integration von Feldgeräten von der Feld- bis hin zur Fabrikebene realisiert, wodurch Anwendungsfälle im Sinne von Industrie-4.0 adressiert werden [27]. Die zweite Ausführungsform des sercos III-Protokollstapels – der Real-Time (RT)-Channel – ist rein auf die Anforderungen industrieller Anwendungen der Feldebene ausgelegt. Entsprechend bleiben die höheren ISO/OSI-Schichten des Protokollstapels zum einen unbesetzt, zum anderen wird in Ethernet-interne Funktionalitäten wie das Medienzugriffsverfahren (MAC) eingegriffen. Dieser Mechanismus ist charakteristisch für bestimmte Industrial-Ethernet-Systeme, die gemäß Klassifizierung zum Industrial Ethernet Typ 3 gezählt werden (siehe Abschnitt 3.2.2).

Das Medienzugriffsverfahren nach IEEE 802.3 wird dezentral über Carrier Sense Multiple Access Collision Detection (CSMA/CD) geregelt. Dabei kann jeder Netzknoten gleichberechtigt auf das Übertragungsmedium zugreifen. Falls das Medium belegt ist, wird dies detektiert,

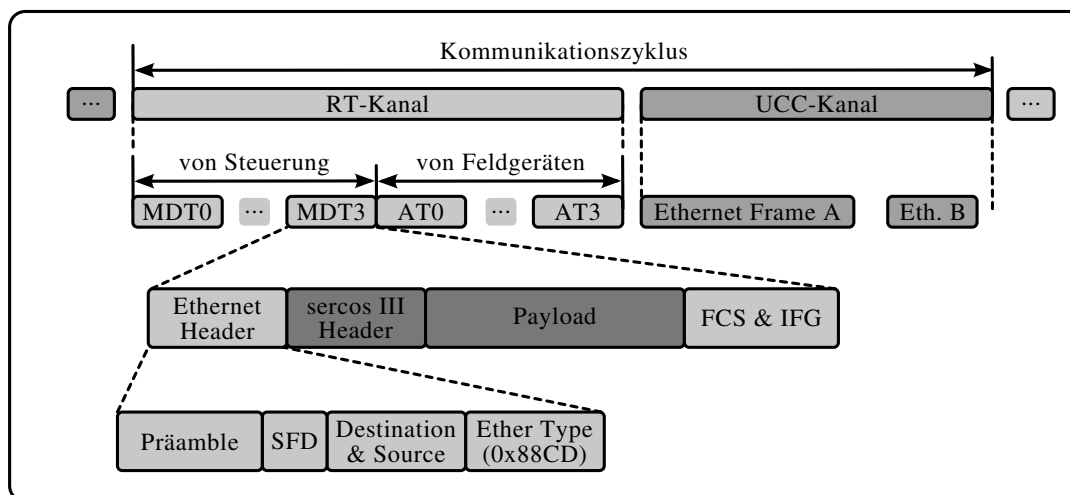


Abbildung 3.2.: Zeitdiagramm des sercos III-Protokolls [5].

die eigene Übertragung zurückgestellt und nach erneutem Ausmessen des Mediums wiederholt. Eben diese unvorhersehbaren Verzögerungen machen CSMA/CD für industrielle Anwendungen mit zeitlichen Schranken unbrauchbar. Deswegen nutzt sercos III ausschließlich die Bitübertragungsschicht von Ethernet, während das Medienzugriffsverfahren proprietär implementiert und über das standardisierte Media Independent Interface (MII) an den Ethernet-Baustein angebunden ist.

### 3.2.1.2. Industrial-Ethernet-Standards

Alle gängigen Industrial-Ethernet-Systeme nach IEC 61784-2 [62] wie Profinet, EtherNet/IP, POWERLINK, EtherCAT und sercos-III basieren auf Fast Ethernet [63]. Beispielsweise setzt Profinet RT auf Softwareerweiterungen, die Virtual Local Area Network (VLAN)-Tags zum Priorisieren von Nutzdaten einsetzen. Ethernet POWERLINK überlagert CSMA/CD mit einem Polling-basierten Medienzugriffsverfahren. Ein Netzknoten fungiert als Master – als sogenannter Managing Node – und regelt über Polling in einer isochronen Phase den Zugriff der übrigen Netzknoten auf das Medium, während in der asynchronen Phase weiterhin CSMA/CD Verwendung findet [64]. EtherNet/IP setzt mit Common Industrial Protocol (CIP)-Sync und dem Precision Timing Protocol (PTP) auf eine Zeitsynchronisation nach IEEE 1588 [65]. Sind alle Netzknoten synchronisiert, können die mit Zeitstempeln versehenen Datenpakete für die industrielle Anwendung entsprechend restauriert werden [32]. Nachteil dieser Methode ist, dass die Protokoll-basierte Restaurierung der Zeitbasis eine Totzeit mit sich bringt, die für die Regelung einer industriellen Anwendung zu Ungenauigkeiten führt.

Zusätzliche Hardwarebausteine setzen Industrial-Ethernet-Systeme wie EtherCAT, sercos III und Profinet Isochronous Real-Time (IRT) ein. Mit diesen Systemen können Reaktionszeiten in der Größenordnung weniger Millisekunden realisiert werden. Abbildung 3.2 zeigt exemplarisch das Zeitdiagramm einer Paketfolge am Beispiel von sercos III. Die Zeit wird unterteilt in Kommunikationszyklen, die sich periodisch mit der Zykluszeit wiederholen. Innerhalb des Kommunikationszyklus werden Nutzdaten der industriellen Anwendung im RT-Kanal übertragen, während der UCC für die Übertragung sporadischer Daten zur Verfügung steht. Jedes einzelne Datenpaket ist als Ethernet-Frame aufgebaut. Durch Signalisierung mittels des Ether-

Tabelle 3.1.: Klassifizierung von Industrial-Ethernet-Systemen.

Klassifizierung	Typ 1	Typ 2	Typ 3
Merkmal:			
– geringe Latenz	-	○	●
– geringer Jitter	- / ○	○	●
– off-the-shelf Bausteine	●	○ / ●	- / ○
Beispiel	Modbus, Ethernet/IP	Profinet RT, POWERLINK	EtherCAT, sercos III

Types wird die Zugehörigkeit zu RT-Kanal oder UCC geregelt. Der RT-Kanal besteht aus einer Reihe von Ethernet-Frames, die die Kommunikation von Master zu Slave über das Master Data Telegram (MDT) bzw. umgekehrt von Slave zu Master über das Answer Telegram (AT) aufbauen. Im sercos-III-Header des jeweiligen Datenpakets hinterlegt der Master die Information, wo jeder Netzknoten seine Nutzdaten auszulesen und abzulegen hat. Dabei implementiert sercos III ein Summenrahmenprotokoll. Die gesamte Rahmenstruktur der sercos-III-Datenpakete ist statisch und wird in der Konfigurationsphase entsprechend der Knotenzahl, Nutzdaten, Zykluszeit und anderen Parametern ausgehandelt. Das Timing der Rahmenstruktur wird vollständig durch den Master bestimmt. Die übrigen Netzknoten erhalten über Signalisierungssequenzen in MDT0 die nötigen Synchronisationsinformation und wissen stets über den sercos-III-Header, wo sie im Falle eines MDT-Datenpakets die Nutzdaten auszulesen, im Falle eines AT-Datenpakets die Nutzdaten abzulegen haben. Da dies ohne Zwischenspeicherung in den Netzknoten geschieht, bleibt die Latenz der Ethernet-Frames beim Durchlaufen eines Netzknotens im Bereich weniger Nanosekunden [32].

### 3.2.2. Klassifizierung und Entwicklungstrends

Sowohl die Einsatzbereiche für Industrial Ethernet, als auch die Mechanismen, die bei der Umsetzung von Industrial-Ethernet-Systemen zum Einsatz kommen, sind vielfältig. Mit Tabelle 3.1 wird daher ein kompakter Überblick zu gängigen Industrial-Ethernet-Systemen und deren Klassifizierung im Hinblick auf charakteristische Eigenschaften gegeben. Als Klassifizierungsmerkmale dienen einerseits die Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Übertragungslatenz und des Jitters, andererseits der Aufwand für das Industrial-Ethernet-System. Dieser bemisst sich daran, ob und in wie weit off-the-shelf Standardbausteine eingesetzt werden können.

Industrial-Ethernet-Systeme vom Typ 1 basieren auf Standardhardware und fußen vollständig auf dem TCP/IP-Stack. Systeme vom Typ 2 unterscheiden sich dahingehend von Typ 1, als dass Software-basierte Erweiterungen auf Basis von Standardhardware zum Einsatz kommen. Durch zugeschnittene Protokolle kann so eine bessere Performance für Latenz und Jitter erzielt werden. Bei Systemen vom Typ 3 werden dedizierte Hardwareerweiterungen eingebracht, mit denen die Leistungsfähigkeit gesteigert werden kann. Typische Vertreter von Typ 3 sind EtherCAT oder sercos III, die den Stand der Technik für Industrial-Ethernet-Systeme mit den höchsten Anforderungen an Übertragungslatenz und Jitter darstellen. Folgerichtig kommen diese Systeme bei industriellen Anwendungen vom Profiltyp (c) zum Einsatz.

Ausgehend vom Stand der Technik für industrielle Kommunikationssysteme erscheinen zwei Entwicklungstrends absehbar. Zum einen werden künftige Industrial-Ethernet-Systeme in ihrer Basistechnologie Gigabit-Ethernet verwenden. Dieser Umstand ist weniger den Anforderungen industrieller Anwendungen der Feldebene selbst geschuldet, als vielmehr dem wachsenden Datenaufkommen, das im Zuge Industrie-4.0-basierter Anwendungsfälle wie Condition Monitoring oder Predictive Maintenance benötigt wird. Für Industrial-Ethernet-Systeme von Typ 1 und Typ 2 stellt die Umstellung von Fast- zu Gigabit-Ethernet kein Problem dar, während für Typ 3 die Entwicklung neuer Hardwarebausteine bewerkstelligt werden muss.

Ein zweiter Entwicklungstrend ist dahingehend auszumachen, als dass die Working Group 802.1 unter dem Dach der IEEE Standardisierungsaktivitäten um Time Sensitive Networking (TSN) vorantreibt [66]. Um ausreichend Performance für Anwendungsfälle aus dem Bereich Automotive oder industrieller Anwendungen bereitzustellen, setzt TSN auf Maßnahmen in allen ISO/OSI-Schichten. Das Bestreben dieses Ansatzes besteht darin, einen einheitliche, von allen Herstellern unterstützten Standard zu etablieren, der eine umfassende Kompatibilität ermöglichen soll. Offen erscheint zum heutigen Zeitpunkt, ob ein neuer und neutraler Standard den von Automatisierungsherstellern dominierten Markt industrieller Kommunikationssysteme zu durchdringen vermag.

### 3.3. Funkbasierte industrielle Kommunikationssysteme

In gleicher Weise wie für drahtgebundene Systeme existiert auch für funkbasierte industrielle Kommunikationssysteme ein ganzer Strauß an Lösungsvarianten, die sich je nach Einsatzgebiet und konkreter Funktechnik stark voneinander unterscheiden. In diesem Abschnitt soll daher ein Überblick gegeben werden, welche Funkstandards im industriellen Kontext zum Einsatz kommen, wie Funkstandards und Protokolle punktuell erweitert werden und welche proprietären industriellen Funksysteme für industrielle Anwendungen bereits verfügbar sind. Dabei liegt der Fokus auf Technologien und Standards, die für die Fertigungsautomatisierung relevant sind.

#### 3.3.1. Einsatz von Funkstandards

Ähnlich wie bei Industrial Ethernet setzt sich auch bei funkbasierten industriellen Kommunikationssystemen der Trend fort, auf etablierte Funkstandards zurückzugreifen [27]. An dieser Stelle werden zunächst gängige und für die industrielle Kommunikation relevante Funkstandards betrachtet.

##### 3.3.1.1. IEEE-802.xx-Familie

Von den in den lizenzfreien ISM-Bändern operierenden Funktechnologien stellt die IEEE-802.xx-Familie mit ihren Standards IEEE 802.11 [58] für WLAN, IEEE 802.15.1 [67] für Bluetooth und IEEE 802.15.4 [18] für Wireless Personal Area Network (WPAN) die bekanntesten Technologien dar. Für diese Standards sind zahlreiche off-the-shelf Komponenten verfügbar, die ob ihrer unterschiedlichen Eigenschaften in verschiedenen Anwendungsbereichen eingesetzt werden können.

###### 3.3.1.1.1. IEEE 802.11 – WLAN

Der WLAN-Standard nach IEEE 802.11 umfasst selbst wiederum eine ganze Reihe von

Standardvarianten, die im Laufe der Entwicklungszyklen auf jeder Open Systems Interconnect (OSI)-Schicht Neuerungen erfuhren. Über diese Entwicklungszyklen hinweg blieb das für industrielle Kommunikationssystem relevante Medienzugriffsschema im Kern erhalten.

Wie bei Ethernet basiert der Medienzugriff bei IEEE 802.11 auf CSMA. Ein Netzknoten vermisst im Carrier Sensing das Übertragungsmedium hinsichtlich der Nutzung durch andere Knoten, bevor er selbst auf das Medium zugreift. Ist das Medium belegt, sieht WLAN im Gegensatz zu Ethernet die Variante Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance (CSMA/CA) vor. Dabei startet ein Netzknoten das Senden nicht unmittelbar nach Freiwerden des Mediums, sondern nach einem zufällig gewählten Zeitintervall. Optional kann die Übertragung durch Request-to-Send (RTS) und Clear-to-Send (CTS) unterstützt werden. Ein Sender kann durch RTS – ein Empfänger durch CTS – andere Knoten dazu bringen, für die Zeit seiner Übertragung selbst nicht zu senden.

Die Verwendung von CSMA/CA mit binärem exponentiellem Backoff ist durch die in der MAC-Schicht eingebettete Distributed Coordination Function (DCF) spezifiziert. Über der DCF führt die MAC-Schicht die Point Coordination Function (PCF) aus. Die PCF ist typischerweise in der zentralen Steuereinheit – dem Access Point (AP) – implementiert und ermöglicht damit einen zentral gesteuerten Medienzugriff der Funkteilnehmer. Der AP definiert über das Senden eines Beacons eine zeitliche Rahmenstruktur. In diesem Rahmen gibt es wie im Slotted Mode von IEEE 802.15.4 eine Phase mit und ohne Wettbewerb um den Medienzugriff. Im standardmäßigen Wettbewerbsfall wird DCF verwendet, sonst koordiniert der AP per PCF den Medienzugriff.

Die Version IEEE 802.11n [68] des Standards erhöht die Systemkapazität und damit die maximale Datenrate auf dem Funkkanal bis zu  $R_{peak} = 540$  Mbps. Ermöglicht wird das zum einen durch Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) mit bis zu 4 Sende- und Empfangsantennen (4x4-MIMO) und durch Kanalbündelung, also die Kombination von Funkkanälen im 2,4- und 5-GHz-Frequenzband. Zum anderen wird der Overhead der Übertragung durch verkürzte Schutzintervalle zwischen den übertragenen Datensymbolen, als auch durch die Bündelung von Paketbestätigungen – Acknowledgement (ACK) – verringert. Mit der Version IEEE 802.11ac [69] – vermarktet als WiFi-5 – werden die aus IEEE 802.11n bekannten Verfahren wie Kanalbündelung, höherwertige Modulation und MIMO weiter ausgebaut, womit theoretisch eine maximale Datenrate von  $R_{peak} > 6000$  Mbps erreichbar ist.

Die Version IEEE 802.11ax [70] des Standards – vermarktet als WiFi-6 und zur Veröffentlichung geplant für September 2020 – weist mit Orthogonal Frequency Division Multiplex Access (OFDMA) und Uplink Multi-User MIMO (MU-MIMO) zwei wesentliche Neuerungen auf, die weniger auf eine Steigerung der Spitzendatenrate  $R_{peak}$ , als vielmehr auf eine flexiblere Zuweisung der verfügbaren Gesamtdatenrate auf mehrere Funkteilnehmer zielt. Sowohl OFDMA als auch MU-MIMO im Uplink erlauben es, dass mehrere Funkteilnehmer zeitgleich Daten an den AP übertragen können. Dass die Funkteilnehmer koordiniert im gleichen Zeit-Frequenz-Raster (OFDMA) oder Zeit-Raum-Raster (MU-MIMO) operieren können, setzt ein gemanagtes und vor allem synchronisiertes Funknetzwerk voraus. Diese in IEEE 802.11ax spezifizierten Verfahren werden im weiteren in Abschnitt 7.1.1.2 als idealtypische Eigenschaften eines Echtzeitfunksystems für industrielle Kommunikationssysteme identifiziert.

Die Version IEEE 802.11e [71] des Standards spezifiziert QoS-Kriterien für zeitkritische Anwendungen wie Sprache und Video. Dazu bietet die MAC-Schicht die Hybrid Coordination Function (HCF), die Verbesserungen für DCF und PCF vorsieht. Zur Unterscheidung von QoS-Klassen werden den Anwendungen sogenannte Verkehrsklassen zugeordnet. Entsprechend erweitert Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) die Funktionalität der DCF um Verkehrsklassen-bezogene Sendeverzögerungen. Ferner bietet EDCA die Möglichkeit, für vordefinierte Zeitintervalle – sogenannte Transmit Opportunities (TXOP) – das Medium konfliktfrei nutzen zu können. Darüber hinaus erweitert Hybrid Controlled Channel Access (HCCA) die Funktionalität der PCF. Weiterhin können abhängig und unter Auswertung der Verkehrsklassen, -ströme und Queuegrößen flexible Scheduling-Entscheidungen getroffen werden. Kommerziell verfügbare WLAN-Bausteine implementieren typischerweise nur einen Teil von IEEE 802.11e. So wird die Priorisierung von Verkehrsklassen unterstützt, nicht aber der zentral gesteuerte Medienzugriff von HCCA. Zu IEEE 802.11e liegen auf Simulationen beruhende Studien zur Leistungsfähigkeit von EDCA und HCCA unter wechselnden Lastbedingungen, Verkehrsklassen und Knotenzahlen vor [72] [73] [74] [75]. Als Ergebnis können standardkonforme WLAN-Bausteine für industrielle Anwendungen mit weichen Echtzeitanforderungen eingesetzt werden, nicht aber für harte Echtzeitbedingungen auf der Feldebene der Fertigungsautomatisierung [76] [77] [78].

### 3.3.1.1.2. IEEE 802.15.1 – Bluetooth

Die Funktechnologie *Bluetooth* wurde ursprünglich als funkbasierter Kabelersatz für die Bürokommunikation entwickelt. Hierzu schlossen sich unterschiedliche Hersteller aus dem Bereich der Consumer-Elektronik zur Bluetooth Special Interest Group (SIG) zusammen, deren Arbeitsergebnisse in die Bluetooth Spezifikation [79] einfließen. Die Basistechnologie von Bluetooth, sprich die unteren OSI-Schichten, wurden in den Standard IEEE 802.15.1 [67] überführt, der die Bitübertragungs- und Sicherungsschicht von Bluetooth festlegt, die im folgenden näher betrachtet wird.

Von seiner grundlegenden Topologie spannt Bluetooth ein *Piconet* auf. Ein Gerät dient als Master und ermöglicht innerhalb des Piconets die Kommunikation bis zu sieben Slaves. Der Medienzugriff wird über Zeitslitze mittels Time Division Duplex (TDD) der Dauer  $T_{slot} = 625 \mu s$  geregelt, wofür der Master die Synchronisation der Funkteilnehmer als auch die Vergabe der Zeitslitze organisiert. Für jede Übertragung steht die nutzbare Bandbreite  $B_{op} = 1 \text{ MHz}$  zur Verfügung, womit Bluetooth im 2,4-GHz-ISM-Band insgesamt 79 Funkkanäle zur Verfügung stehen. Diese Diversität nutzt Bluetooth zur Steigerung der Robustheit, indem es eine Kombination aus TDD und Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) implementiert, was dem frequenzselektiven Fading eines Signals entgegengewirkt.

In seiner Basisausführung nach Version 1.2 bietet Bluetooth in der Ausführung als Basic-Rate (BR) eine Systemkapazität  $R_{peak} = 1 \text{ Mbps}$ , die in der Version 2.0 der Bluetooth Spezifikation als Enhanced-Data-Rate (EDR) auf  $R_{peak} = 3 \text{ Mbps}$  gesteigert wurde. In Version 3.0 wird zwar eine High-Speed-Ausführung spezifiziert, deren Anstieg der Systemkapazität allerdings nicht aus der Erweiterung der Bluetooth-Basistechnologie erwächst, sondern durch Anbindung an IEEE 802.11. Die Versionen 4.0 beziehungsweise 5.0 der Bluetooth-Spezifikation adressieren insbesondere mit *Bluetooth Low Energy* den Markt der energiesparenden Internet of Things (IoT)-Geräte, womit diese Varianten weniger relevante Eigenschaften für die industrielle Feldebene mit sich bringen.



In Summe bietet Bluetooth – insbesondere IEEE 802.15.1 – durchaus Eigenschaften wie einen geregelten Medienzugriff und robuste Datenübertragung, die mit den wichtigen Anforderungen an industrielle Kommunikationssysteme korrelieren. Als Folge dient Bluetooth als Basistechnologie für den Einsatz in proprietären industriellen Kommunikationssystemen (siehe Abschnitt 3.3.3.1).

### 3.3.1.1.3. IEEE 802.15.4 – Wireless Sensor Networks

Ähnlich wie Bluetooth mit IEEE 802.15.1 bildet der Funkstandard IEEE 802.15.4 [18] die Grundlage von WSN, die als eine Klasse unterschiedlicher Protokollstapel über der Basistechnologie von IEEE 802.15.4 verstanden werden. Der bekannteste Vertreter dieser Klasse ist ZigBee, für den die ZigBee Alliance als Zusammenschluss von Interessenvertretern Protokolle spezifiziert [80]. Im industriellen Kontext werden WSN in der Prozess- und Gebäudeautomatisierung für Anwendungen mit weichen Echtzeitanforderungen eingesetzt [81]. Daher dienen die IEEE-802.15.4-basierten WSN als Grundlage für die industriellen Funkstandards der Prozessautomatisierung wie WirelessHART [21], ISA 100.11a [22] sowie WIA-PA [24].

IEEE 802.15.4 [18] spezifiziert eine Reihe von Luftschnittstellen auf der Bitübertragungsschicht, von denen das gängigste und am weitesten verbreitete im 2,4-GHz-ISM-Band operiert und dort eine Bandbreite von  $B_{op} = 2$  MHz pro Funkkanal bei einer Anzahl von 16 Funkkanälen über das Frequenzband hinweg nutzt. Mit einer O-QPSK-basierten Modulation und Spreizung im Zeitbereich durch Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) wird eine Systemkapazität von  $R_{peak} = 250$  kbps erreicht.

Prinzipiell unterstützt IEEE 802.15.4 unterschiedliche Funktopologien. Für vermaschte Topologien obliegt es den höheren Schichten wie beispielsweise ZigBee, die Betriebsweise eines Funknetzes zu spezifizieren. Für die Sterntopologie allerdings definiert bereits IEEE 802.15.4, wie die Funkteilnehmer der Sterntopologie mit dem zentralen, sogenannten Personal Area Network (PAN)-Koordinator kommunizieren. Der PAN-Koordinator zeichnet sich dadurch aus, dass er stets empfangsbereit ist, während sich die restlichen Funkteilnehmer zumeist in einem energiesparenden Betriebsmodus befinden. Der Standard IEEE 802.15.4 sieht zwei Betriebsmodi vor:

- Im *Unslotted Mode* wachen die Endgeräte typischerweise ereignis- oder zeitgesteuert auf, um Daten an den Koordinator zu übertragen oder umgekehrt beim Koordinator anzufragen, ob Daten für sie vorliegen. Der Medienzugriff der Endgeräte erfolgt in diesem Modus asynchron und basiert auf CSMA/CA.
- Im *Slotted Mode* spannt der PAN-Koordinator durch das Aussenden von Beacons einen Superframe auf, der in 16 Zeitschlitze unterteilt wird. Zeitschlitze können nun zu Contention Access Period (CAP) oder Contention Free Period (CFP) konfiguriert werden. In der CAP wird weiterhin CSMA/CA ausgeführt, während in der CFP nach expliziter Zuweisung durch den PAN-Koordinator einzelne Teilnehmer wettbewerbsfrei und deterministisch über Guaranteed Time Slots (GTS) auf das Übertragungsmedium zugreifen können.

In der Abwägung der beiden Modi ist festzustellen, dass der Unslotted Mode einfacher zu realisieren ist, hinsichtlich zeitlicher Schranken allerdings wenig geeignet ist. Der Slotted

Mode bietet in Form seiner GTS zugesicherte Übertragungszeitpunkte. Allerdings erfordert der Slotted Mode eine gewisse Infrastruktur innerhalb des Funknetzes, insbesondere eine Synchronisation aller Funkteilnehmer. All diese Eigenschaften widersprechen wiederum den grundlegenden Treibern zum Entwurf des IEEE 802.15.4 Standards, der auf energieeffiziente Funkknoten zielt fern jeder Echtzeitanforderung [82].

Die Version IEEE 802.15.4e [83] des Standards spezifiziert eine Reihe von MAC-Erweiterungen, die mit Low Latency Deterministic Network (LLDN) oder Time Slotted Channel Hopping (TSCH) auf industrielle Anwendungen in der Prozessindustrie abzielen. Übernommen in die Hauptnorm IEEE 802.15.4 [18] wurde einzig das Medienzugriffsverfahren TSCH, das im Kern auf einer Kombination aus Time Division Multiple Access (TDMA) und Frequency Division Multiplex Access (FDMA) beruht. Um TSCH nutzen zu können, wird ein PAN im Slotted Mode betrieben, und alle Funkteilnehmer müssen synchronisiert werden. TSCH verbessert zwar die Zuverlässigkeit und den Determinismus der Datenübertragung, harte oder isochrone Echtzeitanforderungen sind mit TSCH jedoch nicht realisierbar.

## 3.3.1.2. Standards der Telekommunikation

Die von der ETSI veröffentlichten Telekommunikationsstandards beinhalten eine Vielzahl von Funktechnologien, von denen einige hinsichtlich ihrer Eignung für industrielle Anwendungen auf Feldebene vielversprechende Ansätze beinhalten, die sich mitunter in proprietären industriellen Funksystemen wiederfinden.

### 3.3.1.2.1. Digital Enhanced Cordless Telecommunications – DECT

Mit dem Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT)-Standard spezifiziert die ETSI einen Funkstandard für das schnurlose Telefonieren. Die Technologie ist als Weiterentwicklung für Schnurtelefone gedacht und dient daher zum einen der Übertragung von Sprache, zum anderen können auch Datenpakete ausgetauscht werden.

DECT-Systeme werden prinzipiell in Sterntopologie ausgeführt. Die Basisstation repräsentiert den Funk-Master; die Endgeräte die Funk-Slaves. Auf der Luftschnittstelle stehen standardmäßig zehn Funkkanäle zu je 1,728 MHz zur Verfügung, die in eine nutzbare Bandbreite von  $B_{op} = 17,28 \text{ MHz}$  im von den Regulierungsbehörden zugeteilten Frequenzbereich von 1880 MHz bis 1900 MHz ergeben. Dazu prägt die Basisstation dem System durch periodische Beacons eine zeitliche Struktur auf. Damit wird ein DECT-Rahmen von 10 ms aufgespannt, der aus 24 Zeitschlitzten besteht, die für Sprachdienste typischerweise symmetrisch zwischen dem Uplink von Endgerät zur Basisstation und dem Downlink aufgeteilt werden. Für Datenübertragungen sind auch asymmetrische Verteilungen möglich. Abzüglich des Signalisierungsoverheads kann mit DECT eine Systemkapazität von  $R_{peak} = 1152 \text{ kbps}$  erreicht werden.

Der Medienzugriff auf die verfügbaren Kanäle innerhalb des vordefinierten Zeit- und Frequenzrasters wird über Dynamic Channel Selection (DCS) geregelt. Dabei obliegt es den Endgeräten, kontinuierlich die für sie besten Kanäle zu beobachten. Hierzu werden Pegelmessungen durchgeführt und protokolliert. Für den aus seiner Sicht besten Kanal fordert ein Endgerät schließlich von der Basisstation einen Verbindungsaufbau an. Im laufenden Betrieb werden diese Messungen fortgeführt und gegebenenfalls ein Kanalwechsel initiiert.

Ob seiner Eigenschaften zeigt sich DECT von technischer Seite durchaus geeignet für industrielle Anwendungen [84]. Dem steht allerdings die regulatorisch zweckgebundene Nutzung von DECT im zugewiesenen Frequenzband gegenüber. Prinzipiell existiert mit Up-banded DECT auch eine Variante im lizenzfreien ISM-Band, die auf den amerikanischen Markt zielt. Diese lizenzfrei Variante hat durch Frequenzzuteilung seitens der Federal Communications Commission (FCC) jedoch an Bedeutung verloren.

### 3.3.1.2.2. Mobilfunkstandards – GSM, UMTS, LTE & 5G

Die Mobilfunktechnologien und ihre zugehörigen Standardfamilien genießen größte Aufmerksamkeit innerhalb der ETSI. Der weltweit am weitesten verbreitete Standard ist nach wie vor der Mobilfunkstandard der 2. Generation (2G), das Global System for Mobile Communication (GSM). Erweiterungen von GSM um Datendienste wie General Packet Radio Service (GPRS) und Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE) werden als 2.5G und bezeichnet. Mit Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) erfolgt der Generationssprung zu 3G, das wiederum durch Erweiterung um die High Speed Packet Access (HSPA)-Features zu 3.5G wurde. Mit Long Term Evolution (LTE) erfolgt der nächste und bislang letzte Wechsel der physikalischen Luftschnittstelle. Da LTE nicht die Leistungsmerkmale eines von der ETSI definierten 4G-Systems erreicht, wird es als 3.9G bezeichnet. Erst dessen Nachfolger LTE-Advanced gilt als echte 4G-fähige Technologie; im Kern basiert auch 5G auf der gleichen Luftschnittstelle wie LTE.

Die Entwicklung durch die verschiedenen Mobilfunkgenerationen hinweg ist gekennzeichnet von einem steten Hunger nach mehr Datenrate. Liegt die Systemkapazität der ersten 2G Datendienste noch bei wenigen kbps, so reklamiert 4G eine Systemkapazität von  $R_{peak} = 1$  Gbps für sich. Mit der Entwicklung von 4G gewinnen erstmalig vermehrt Aspekte wie Performance am Zellrand, reduzierte Latenzzeiten – im Hinblick auf Online-Spiele – an Bedeutung. In die Spezifikation der 5. Mobilfunkgeneration fließen schließlich auch Anforderungen industrieller, echtzeitkritischer Anwendungen mit Übertragungslatenzen im Bereich weniger Millisekunden [59] [85] ein, die unter dem Schlagwort *Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC)* adressiert werden. Um diese echtzeitkritischen Anwendungen der Fertigungsautomatisierung zu realisieren, berücksichtigt insbesondere 3GPP Release 16 [86] – das im Herbst 2020 freigegeben wird – dedizierte Verbesserungen für URLLC bis hinunter zur Luftschnittstelle, sowie die Unterstützung für die Integration von 5G in drahtgebundene legacy Systeme – adressiert unter dem Schlagwort *LAN Support for 5G*. Die bislang – zum Herbst 2020 – in Deutschland in Betrieb gegangenen 5G-Netze basieren bislang auf Release 15 [87] und bieten daher nicht die volle Unterstützung für echtzeitkritische Anwendungen [60]. Weitere Verbesserungen für URLLC sehen die 3GPP-Arbeitsgruppen auch für Release 17 vor, dessen Freigabe für 2022 geplant ist [88].

Betrachtet man einzelne Merkmale der Mobilfunkstandards, so zeigt bereits GSM, wie eine Basisstation mit einer Vielzahl schmalbandiger Endgeräte durch ein Zeitschlitz-basiertes Medienzugriffsschema wie TDMA kommunizieren kann. Gepaart mit einem Frequenzsprungverfahren der schmalbandigen Endgeräte zwischen den TDMA-Rahmen ist dieser Ansatz dem von Bluetooth vergleichbar. Der Mobilfunkstandard LTE bietet breitbandige Funkkomponenten mit hoher nutzbarer Bandbreite  $B_{op}$ . Auf der Luftschnittstelle setzen sich diese breitbandigen Signale aus einer Menge von orthogonalen Unterträgern im Sinne von Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) zusammen. Diese Signale können aufgrund ihrer Eigenschaften mit geringem Aufwand am Empfänger detektiert werden. Ein weiterer Vorteil

besteht darin, dass einzelne Unterträgergruppen dedizierten Funkteilnehmern zugewiesen werden können, was als OFDMA-basierter Medienzugriff bezeichnet wird. Ein LTE-Scheduler in der Basisstation zeichnet ferner verantwortlich für die Allokation der Ressourcen. Für diese Entscheidung berücksichtigt er einerseits die QoS-Anforderungen einer Anwendung, andererseits die Eigenschaften des Funkkanals im Kontext aller Funkteilnehmer innerhalb einer Funkzelle.

Von technischer Seite sind die Eigenschaften von 4G – insbesondere der OFDMA-basierte Medienzugriff auf der Luftschnittstelle – bereits gut auf die Anforderungen industrieller Anwendungen abbildbar. Infolgedessen finden sie sich als Grundlage für den Entwurf eines idealtypischen Echtzeitfunksystems für industrielle Kommunikationssysteme in Abschnitt 7.1.1.2 wieder. Mit 5G in seiner Ausbaustufe Release 16 steht hingegen ein Funksystem zur Verfügung, das über die grundlegenden Eigenschaften wie Luftschnittstelle und Medienzugriffsverfahren hinaus als ganzheitliches Kommunikationssystem die Anforderungen industrieller Anwendungen der Fertigungsautomatisierung in den Blick nimmt. Dabei zeigt neben steten Verbesserungen im Core-Network (Evolved Packet Core (EPC)) insbesondere das Network Slicing für den Performance-Gewinn von URLLC verantwortlich. Das bedeutet, ein 5G-Funksystem kann bis hinunter zu seiner Luftschnittstelle – genauer gesagt bis auf die Parametrierung des OFDMA-basierten Zeit-Frequenz-Rasters – zugeschnitten werden. Damit kann je nach Anwendung und QoS-Anforderungen die benötigte Systembandbreite, der Unterträgerabstand, die Länge des Schutzintervalls und andere Parameter passgenau konfiguriert werden. Diese Flexibilität setzt voraus, dass die Transceiver der Funkkomponenten fähig sind, sich auf eine Konfiguration zu einigen. Im typischen Falle wird ein einfaches 5G-Endgerät – das User Equipment (UE) – nur eine bestimmte, seinem Anwendungsfall entsprechende Konfiguration implementieren, während die Basisstation – die Next generation eNodeB (gNB) – die volle Bandbreite aller Konfigurationen ausführen können muss.

Neben den technischen Eigenschaften der Mobilfunkstandards 4G und 5G – beide eignen sich zweifelsfrei auch für industrielle Zwecke – ist vielmehr die organisatorische und wirtschaftliche Frage zu klären, welche Geschäftsmodelle für die Automatisierungsbranche und insbesondere für mittelständische Maschinenbauer entwickelt werden können. Wie bereits in Abschnitt 2.4.3 dargestellt, ist die Frage der lokalen Nutzung von 5G-Frequenzen innerhalb einer Fertigungsanlage mit der derzeitigen Vergabepraxis seitens der Bundesnetzagentur in Deutschland unbefriedigend beantwortet.

### 3.3.2. Erweiterungen für Funkstandards

Um die diskutierten Funkstandards auf die Anforderungen industrieller Anforderungen anzupassen, bieten sich eine Reihe von Maßnahmen an, deren Stand der Technik und Forschung im folgenden beleuchtet wird.

#### 3.3.2.1. Deterministischer Medienzugriffsverfahren

Betrachtet man die Echtzeitfähigkeit eines industriellen Kommunikationssystems, ist die Art des Medienzugriffs eine wichtige Stellschraube. Kann der Medienzugriff deterministisch gestaltet werden, so können verlässliche Aussagen über die Einhaltung zeitlicher Schranken getroffen werden.

Für WLAN-Systeme adressieren zahlreiche proprietäre Erweiterungen eine Verbesserung der Deterministik des standardmäßigen Medienzugriffsverfahrens CSMA/CA-Verfahrens beziehungsweise der im Standard verankerten Erweiterungen wie EDCA, PCF oder HCCA. Diese im Hinblick auf industrielle Funksysteme eingebrachten Ansätze basieren beispielsweise auf Token Passing [89], Polling [11] [12] [90] und TDMA [91] [92].

Token Passing ist ein bei Feldbussen gängiges Medienzugriffsverfahren, dessen Grundidee als Virtual Token Passing (VTP) auf WLAN-Systeme übertragbar ist [89]. Der Ausgangspunkt von VTP ist EDCA nach IEEE 802.11e, bei dem die Netzknoten mit Echtzeitdaten zu einer Gruppe zusammengefasst werden. Jedes Mitglied der Gruppe wird mit einem eindeutigen Kennzeichner, dem virtuellen Token, versehen, das als lokaler Zugangszähler realisiert ist. Das Token wird innerhalb der Gruppe weitergereicht, und nur der Besitzer des Tokens hat Zugriff auf das Medium. Gegenüber anderen Funkteilnehmern des Funksystems werden Netzknoten mit Echtzeitdaten dahingehend bevorzugt, dass sie gemäß IEEE 802.11e der höchsten Verkehrsklasse zugeordnet werden.

Beim Polling-basierten Ansatz fragt der Master jeden Funk-Slave einzeln nach zu übertragenden Daten, was für ein WLAN-System nach IEEE 802.11b [58] im Zusammenspiel mit einem bestehenden PROFIBUS-System gezeigt wird. Round-Robin-basiertes Scheduling erweist sich als effizientes Verfahren gemessen an den statistischen Kenngrößen der Übertragungslatenz unter Lastbedingungen, Kanalfehlern und wechselnder Knotenzahl [11]. In ähnlicher Weise kann ein Polling-basierter Medienzugriff für WLAN zur Anbindung an Ethernet POWERLINK verwendet werden [12] [90].

Im Vergleich zu Polling oder Token Passing erweist sich TDMA als effektivstes Verfahren, den Medienzugriff deterministisch zu gestalten [91]. Durch Zuweisung von exklusiven Zeitschlitzten – mitunter getrennt für Uplink und Downlink – wird den Funkteilnehmern die Möglichkeit zur Datenübertragung garantiert [92]. Im Zusammenspiel mit beispielsweise EDCA nach IEEE 802.11e kann eine wettbewerbsorientierte Medienzugriffsphase für Daten anderer Verkehrsklassen hinzugefügt werden [93]. Schlüssel zur korrekten Funktionsweise von TDMA in Kombination mit WLAN ist eine hinreichend genaue zeitliche Synchronisation der Netzknoten. Hierfür wird PTP nach IEEE 1588 [65] mit Zeitstempeln auf der Treiberebene kombiniert. So sind Synchronisationsfehler im Bereich  $< 10\mu\text{s}$  bei einem Jitter  $< 0,6\mu\text{s}$  für Zykluszeiten im Bereich von 50 ms bis 200 ms bei 24 Knoten möglich [94].

Ausgehend vom Mobilfunkstandard LTE erweist sich dessen Medienzugriffsschema OFDMA als besonders geeignet, eine Vielzahl von Funkteilnehmern mit jeweils kleinen Datenmengen effizient von einer Basisstation versorgen zu können. Hierbei liefert OFDMA im Vergleich zu TDMA aufgrund der Einsparung von Schaltzeiten der Transceiver eine verbesserte Echtzeitfähigkeit, insbesondere bei steigender Zahl der Funkteilnehmer. Die Ursache hierfür liegt darin, dass mehrere Netzknoten zur gleichen Zeit, aber auf unterschiedlichen Frequenzen, auf das Übertragungsmedium zugreifen und so ihre kleinen, zyklisch anfallenden Nutzdaten kontinuierlich übertragen können [95].

Eine verfeinerte Analyse samt systematischer, modellbasierter Evaluierung der unterschiedlichen Medienzugriffsverfahren erfolgt im Kontext der Latenzmodellierung funkbasierter Datenübertragung (siehe Abschnitt 5.4.1.2).

### 3.3.2.2. Robustheit durch Redundanz

Das Hinzufügen von Redundanz ist eine bewährte Maßnahme, die Zuverlässigkeit der Datenübertragung eines Funksystems zu steigern. Hierzu bieten bereits die angesprochenen Funkstandards Bordmittel wie variable Modulationsschemata, Frequenzsprungverfahren oder Verfahren der Vorwärts- und Rückwärtsfehlerkorrektur.

Rein aus dem Blickwinkel der Robustheit erweist sich die Rückwärtsfehlerkorrektur als effektives und zugleich einfaches Verfahren, indem fehlerhaft empfangene Datenpakete typischerweise auf Ebene der Sicherungsschicht wiederholt werden. Ist der Übertragungskanal temporär gestört, reicht die zeitliche Diversität dieses Verfahrens aus, die Robustheit der Datenübertragung signifikant zu erhöhen. Andererseits beeinflussen Paketwiederholungen die Übertragungslatenz von Datenpaketen. Um diesen Widerspruch zu den harten Echtzeitanforderungen zu lösen, werden beispielsweise Strategien für Paketwiederholungen für ein Funksystem in Anlehnung an den IEEE 802.15.4-basierten Slotted Mode betrachtet [96]. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass die Rückwärtsfehlerkorrektur für industrielle Kommunikationssysteme aufgrund des negativen Einflusses für die Übertragungslatenz ein sorgsam zu dosierendes Mittel bleiben muss.

In Anlehnung an die Standards Bluetooth und GSM kann durch Frequenzsprungverfahren die Frequenzdiversität eines Funksystems ausgenutzt werden. Auch für breitbandige Funksysteme kann der Frequency-Hopping-Ansatz in Kombination mit dem Medienzugriffsschema OFDMA realisiert werden [97]. Hier bietet sich zudem eine Kombination aus Paketwiederholung und Frequenzsprungverfahren an, das heißt sowohl zeitliche als auch räumliche Diversität werden genutzt.

Zusätzlich kann Frequenzdiversität genutzt werden, indem a priori eine vollständig redundante Übertragung eines Datenpakets auf unterschiedlichen Übertragungskanälen erfolgt. Für ein IEEE 802.15.4-basiertes beziehungsweise proprietäres Funksystem in den ISM-Bändern bei 433/868 MHz und 2,4 GHz können so in realen industriellen Umgebungen Paketverlustraten in der Größenordnung  $10^{-7}$  erzielt werden [98].

Einen Schritt weiter reichen Ansätze mit dem Parallel Redundancy Protocol (PRP) nach IEC 62439 [99]. Das PRP selbst arbeitet auf Basis von Ethernet und ist damit direkt auf Industrial Ethernet anwendbar. Die Idee besteht darin, ein (Industrial-)Ethernet-Datenpaket über eine PRP-kompatible Splitterkomponente auszukoppeln und über eine redundante Funkkomponenten auszuführen. Auf der Gegenstelle werden die Signale mit einem komplementären Aufbau wieder kombiniert. Durch diesen Ansatz stehen dem Funksystem je nach der konkreten Ausführung mehrere Diversitätsgrade zur Verfügung, allen voran Frequenz- und Raumdiversität [100]. Neben dem PRP hält der Standard IEC 62439 mit High-availability Seamless Redundancy (HSR) ein weiteres Konzept zur Erhöhung der Redundanz für Ethernet-basierte Netzwerke bereit. Auch dessen Wirksamkeit wurde im Zusammenspiel mit einem zwischengeschalteten WLAN-basiertem Funksystem nachgewiesen [101].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass jede Verbesserung der Robustheit der Datenübertragung ihren Preis hat. Nutzt man die zeitliche Diversität, leidet die Übertragungslatenz. Zielt man auf eine Verbesserung durch Frequenzdiversität, sind bei paralleler Übertragung mehrere Transceiver vonnöten. Reichert man weiterführende Konzepte wie PRP oder HSR mit

Funkkomponenten an, so steigt schlicht deren Anzahl und einhergehend damit die Komplexität des Gesamtsystems, der Inbetriebnahme und des Wartungsprozesses. Als Ergebnis mündet die Frage nach der Erhöhung der Redundanz zugunsten der Robustheit der Datenübertragung in ein Optimierungsproblem, welches beispielsweise mit dem Entwurfsziel eines deterministischen Zeitverhaltens im Sinne von weicher Echtzeit für ein IEEE-802.11-basiertes WLAN-System in Kombination mit HSR gelöst wurde [102].

### 3.3.2.3. Erweiterungen höherer Protokollschichten

Mit der Zielvorgabe, weiche Echtzeitanforderungen zu erfüllen, setzen Verfahren für höhere Protokollschichten darauf, bestehende Funkstandards und ihre off-the-shelf Komponenten zu verwenden – und für diese durch Anpassen und Erweitern einen Performancegewinn zu erreichen.

Beispielsweise kann die Transportschicht oberhalb von WLAN- oder IEEE 802.15.4-basierten Funksystemen herangezogen werden und hinsichtlich der Strategien für Paketwiederholungen unter Berücksichtigung von Echtzeitschranken optimiert werden [10] [103]. Zur Lösung des Optimierungsproblems wird eine Real-Time-Scheduling-Analyse nach dem Kriterium Earliest Deadline First (EDF) vorgeschlagen, die über die Durchführung einer Paketwiederholung entscheidet [104]. Gemäß dem ISO/OSI-Referenzmodell implementieren Funksysteme wie WLAN bereits auf Sicherungsschicht Paketwiederholungen im Sinne der Rückwärtsfehlerkorrektur. In diesem Falle bietet sich je nach Ausführung und Konfigurierbarkeit einer Funkkomponente an, Paketwiederholungen auf Sicherungsschicht strikt zu begrenzen, um der Transportschicht und deren Scheduler höhere Freiheitsgrade zu überlassen.

Aufbauend auf off-the-shelf Komponenten können stets Protokolle auf Anwendungsschicht eingesetzt werden, mit denen beispielsweise die Übertragungslatenzen von Alarmpaketen – einzelnen sporadischen Datenpaketen – eines Funkteilnehmers bei unterschiedlichen Lastbedingungen auf dem Übertragungsmedium optimiert werden [105] [106]. Hier lässt sich festhalten, dass die Charakteristika sporadischer Alarmsignale nicht mit dem zyklischen Datenaufkommen industrieller Anwendungen der Feldebene vergleichbar sind.

In Summe kann man für die Relevanz höherer Protokollschichten festhalten, dass die OSI-Schichten oberhalb der Sicherungsschicht kaum Performancegewinne für industrielle Kommunikationssysteme auf der Feldebene und deren Anforderungen mit sich bringen. Im Umkehrschluss können jedoch falsch eingebrachte Elemente auf höheren Schichten beispielsweise die Echtzeitperformance negativ beeinflussen, weswegen typische Industrial-Ethernet-Systeme in ihrer Ausführung des Protokollstapels auf die höheren Schichten verzichten. Bringt man folglich Elemente in höhere Protokollschichten ein, ist ein Abwägen hinsichtlich der resultierenden Latenzen unerlässlich.

### 3.3.3. Proprietäre industrielle Funksysteme

Betrachtet man den Stand der Technik für industrielle Funksysteme, die dediziert für die Feldebene der Fertigungsautomatisierung entwickelt wurden, so zielen alle bekannten Verfahren auf die Anwendungsklasse von Sensor-Aktor-Netzwerken. Diese repräsentieren gemäß Anforderungsanalyse mit dem Profiltyp (b) nur eine Klasse industrieller Anwendungen der Feldebene.

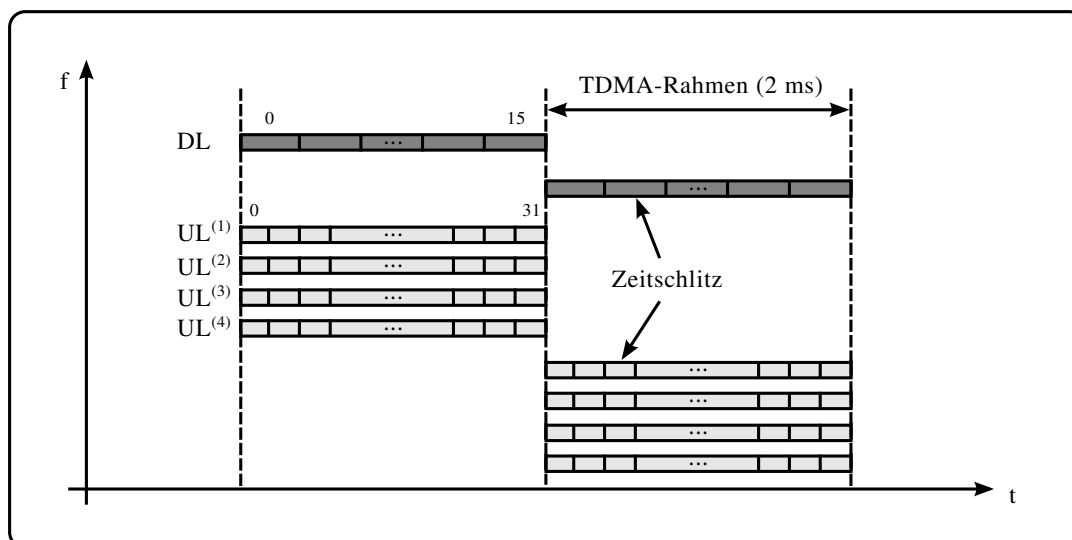


Abbildung 3.3.: Proprietäres Medienzugriffsschema von WISA.

### 3.3.3.1. Wireless Interface for Sensors and Actuators – WISA

Dem Systementwurf für WISA [39] liegt das Anforderungsprofil (b-1) eines Sensor-Aktor-Netzwerks zugrunde. Das heißt, es sollen bis zu  $N = 120$  Funkteilnehmer mit einer Übertragungslatenz von  $D_{x,n} = 15 \text{ ms}$  bei einer Aktualisierungszeit seitens der Anwendung von  $T_{up} = 200 \text{ ms}$  in einer Funkzelle unterstützt werden.

Von seiner grundlegenden Betriebsart stellt WISA ein synchrones Funknetzwerk im Halbduplex-Modus dar. Es setzt wie Bluetooth auf der Bitübertragungsschicht von IEEE 802.15.1 auf und wird in einer Sterntopologie mit einem zentralen Funk-Master betrieben, der über ein proprietäres Medienzugriffsschema den Zugriff auf die Luftschnittstelle regelt. Die grundlegende Wirkweise des Medienzugriffs veranschaulicht Abbildung 3.3. Ein an den Mobilfunkstandard GSM angelehnter Ansatz aus TDMA, Frequency Division Duplex (FDD) und Frequency Hopping (FH) teilt das verfügbare Zeit-Frequenz-Raster im Frequenzbereich in explizite Kanäle für Downlink (DL) und Uplink (UL), im Zeitbereich in TDMA-Rahmen und darin enthaltenen Zeitschlitzen.

Durch IEEE 802.15.1 stehen WISA im 2,4-GHz-ISM-Band 79 Funkkanäle zur Verfügung. Innerhalb des TDMA-Rahmens bleibt die Zuordnung der Funkkanäle stets unverändert. Dem DL wird ein Funkkanal, dem UL werden 4 Funkkanäle  $UL^{(1)} \dots UL^{(4)}$  zugewiesen. Zwischen den TDMA-Rahmen springen die Frequenzen nach einem festgelegten Hopping-Schema. Im Zeitbereich wird ein TDMA-Rahmen der Dauer 2 ms für den DL in 16, für den UL in 32 Zeitschlitze unterteilt. Auf diese Weise erhält jeder der maximal 120 Sensorknoten, die im Funksystem die Funk-Slaves darstellen, pro TDMA-Rahmen einen festgelegten Zeitschlitz, in dem ein binärer Sensorwert signalisiert werden kann. Ferner sieht WISA eine Rückwärtsfehlerkorrektur vor, die bis zu 7 Paketwiederholungen auf unterschiedlichen Funkkanälen ermöglicht, um einen Sensorwert innerhalb der geforderten Übertragungslatenz von 15 ms zu übertragen.

Darüber hinaus wurden zum einen Methoden untersucht, WISA in das drahtgebundene Profibus-System zu integrieren [107]. Zum anderen sollte WISA als Blaupause für einen funk-



basierten Feldbus-Standard für die Fertigungsautomatisierung dienen [108], was jedoch nicht umgesetzt wurde. Weitere Bestrebungen gehen dahin, auf der Basis von WISA funkbasierte Erweiterungen für I/O-Link nach IEC 61131-9 [109] zu adaptieren [110].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Grundkonzept von WISA eine technisch gute Lösung für die Anforderungen von Sensor-Aktor-Netzwerken bietet. Für Funk-Slaves, also die Vielzahl von Sensorknoten, können IEEE 802.15.1-basierte Funkmodule mit geringem Aufwand auf Protokollebene verwendet werden. Für den Funk-Master wird hingegen Vollduplex-Fähigkeit benötigt, was ein proprietäres Funkmodul nach sich zieht und somit zu erhöhten Kosten führt. Darüber hinaus greift WISA für Anwendungen mit höherem und insbesondere symmetrischen Datenratenbedarf zwischen Funk-Master und seinen -Slaves wie bei Motion-Control-basierten Anwendungen vom Profiltyp (c) aufgrund seiner durch das Medienzugriffsschema festgelegten Verteilung der Systemkapazität  $R_{peak}$  zwischen Downlink und Uplink zu kurz.

### 3.3.3.2. Wireless Sensor/Actuator Network – WSA

Ausgangspunkt für die Entwicklung von WSA [42] ist das Anforderungsprofil (b-2) für Sensor-Aktor-Netzwerke, das sich von der Spezifikation des AS-Interface [44] für industrielle I/O-Geräte ableitet. Dementsprechend soll das Funksystem eine Übertragungslatenz von  $D_{x,n} = 5 \text{ ms}$  für eine Anzahl von  $N = 62$  Funk-Slaves bereitstellen.

Die Grundidee von WSA ist mit der von WISA vergleichbar: Es wird ein TDMA-basierter Medienzugriff innerhalb des Zeit-Frequenz-Rasters im 2,4-GHz-ISM-Band eingesetzt. Im Gegensatz zu WISA verzichtet WSA auf den FDD-Anteil, das heißt der Funk-Master wird nicht im Vollduplex betrieben. Durch Parallelschalten von Funkmodulen am Funk-Master wird stattdessen ein FDMA mit TDMA kombiniert. Damit kann WSA dynamisch ausgelegt werden in der Balance zwischen Robustheit und Datendurchsatz. Durch den FDMA-Ansatz reduzieren sich die Anforderungen hinsichtlich des Dynamikbereichs der Funkmodule. So genügen kostengünstige off-the-shelf Komponenten zum Aufbau des WSA. Bei der Umsetzung von WSA wurde schließlich auf eine proprietäre Funktechnologie im 2,4-GHz-ISM-Band zurückgegriffen.

Hinsichtlich der Anforderungen gemäß Profil (b-2) kann WSA die Übertragungszeiten von 5 ms im typischen Fall erbringen, bei Übertragungsfehlern wird die zeitliche Schranke nicht eingehalten. Aufgrund der vergleichbaren Luftschnittstelle ihrer Funkmodule ist wie bei WISA auch bei WSA die Systemkapazität  $R_{peak}$  ein limitierender Faktor für industrielle Anwendungen mit einem Datenratenbedarf wie für Profiltyp (c).

### 3.3.3.3. IR-UWB-basiertes Kommunikationssystem

Das IR-UWB-basierte Kommunikationssystem [43] adressiert eine weitere funkbasierte Lösung für Sensor-Aktor-Netzwerke. Ähnlich wie bei WSA wurden die Anforderungen für den Entwurf des IR-UWB-Systems vom Actuator-Sensor-Interface (AS-i) nach IEC 62026-2 [44] abgeleitet, was in diesem Falle zu Anforderungen an die Übertragungslatenz von  $D_{x,n} = 20 \text{ ms}$  und einer Verlustrate von  $PLR < 10^{-9}$  bei einer Anzahl von  $N = 32$  Funk-Slaves führt.

Auf seiner Bitübertragungsschicht basiert das IR-UWB-Funksystem auf gepulstem Ultra Wideband, das als eine alternative Bitübertragungsschicht in IEEE 802.15.4a [20] spezifiziert

und schließlich in IEEE 802.15.4 [18] verankert wurde. Die Grundidee der Technologie beruht darauf, Signale mit geringer spektraler Energiedichte bei hoher Systembandbreite zu übertragen. Dadurch verschwinden diese Signale für schmalbandige Empfänger im Rauschen und stören diese nicht. Den breitbandigen Signalen im Frequenzbereich stehen entsprechend kurze, steilflankige Impulse im Zeitbereich gegenüber, mit denen ein Zeitschlitz-basiertes TDMA-Schema realisiert wird.

Die Bitübertragungsschicht des IR-UWB-basierten Kommunikationssystems bietet eine Systemkapazität von  $R_{peak} = 2 \text{ Mbps}$ . Auf der Sicherungsschicht werden zeitgesteuerte Medienzugriffsverfahren betrachtet, von denen sich die TDMA-basierten den Polling-basierten Verfahren als überlegen erweisen – gemessen an den Übertragungslatenzen. Das sogenannte rollenbasierte TDMA liefert die beste Performance. Dazu wird in einer Konfigurationsphase jedem Funkteilnehmer eine feste Rolle zugewiesen, was den Overhead der Signalisierung im operativen Betriebsmodus reduziert. Der Nachteil dieses Ansatzes ist fehlende Flexibilität operativen Betriebsmodus, was für industrielle Anwendungen auf der Feldebene akzeptierbar ist (siehe Abschnitt 2.4.1).

In Summe wird mit diesem Medienzugriffsschema eine Übertragungslatenz von  $D_{x,n} = 15 \text{ ms}$  erreicht. Zur Steigerung der Robustheit werden für Bitübertragungs- und Sicherungsschicht Maßnahmen wie Vorwärtsfehlerkorrektur in Kombination mit Soft-Value-Entscheidungen oder Incremental-Redundancy bei Paketwiederholungen vorgeschlagen. Nach Bewertung der Maßnahmen mittels Simulationsstudien können die Anforderungen an die Verlustrate von  $PLR < 10^{-9}$  eingehalten werden. Klarer Nachteil des IR-UWB-basierten Ansatzes ist die mangelnde Verfügbarkeit von off-the-shelf Funkkomponenten, gerade im Vergleich zu der Vielzahl kostengünstiger IEEE-802.15.4-Komponenten für das 2,4-GHz-ISM-Band. Auch die Systemkapazität von IR-UWB, das auf niederratige Anwendungen ausgelegt ist, kann nicht alle Anforderungsprofile industrieller Anwendungen abdecken.

### 3.4. Integration funkbasierter Kommunikationssysteme

Mit der Erkenntnis, dass funkbasierte Lösungen drahtgebundene Kommunikationssysteme in industriellen Anwendungen nicht vollständig ersetzen werden, steigt die Bedeutung von hybriden industriellen Kommunikationssystemen. In einem ersten Schritt geht es daher darum, funkbasierte Komponenten in bestehende drahtgebundene Kommunikationssysteme zu integrieren beziehungsweise drahtgebundene Systeme zu erweitern [111]. Im nächsten Schritt sollen unterschiedliche Kommunikationstechnologien derart nahtlos miteinander interagieren können, sodass sie als integrale Bausteine eines Cyber-physikalischen Systems wirken, das die Basis für künftige Anwendungsfälle der Industrie 4.0 darstellt [112].

Gemäß ISO/OSI-Referenzmodell gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, Kommunikationssysteme miteinander zu verbinden. Für industrielle Kommunikationssysteme bieten sich, je nach Ausprägung des Protokollstapels der beteiligten Systemkomponenten, insbesondere die beiden Optionen an, Teilsysteme entweder auf der Sicherungsschicht im Sinne einer Bridge, oder auf höheren Protokollschichten im Sinne eines Gateways zu koppeln [113]. Hierfür gibt die Anbindung von IEEE 802.11- und 802.15.4-basierten Funkkomponenten an Ethernet POWERLINK-Systeme [114] [115] ein Beispiel für die Integration von Funkkomponenten in bestehende Industrial-Ethernet-Systeme vom Typ 2. Weitere Beispiele zeigen die Kopplung

des proprietären Funksystems WISA an Profinet [107] oder die Anbindung von IEEE 802.11-basierten Komponenten an das Profinet-Feldbus-Pendant PROFIBUS [116].

Für Industrial-Ethernet-Systeme vom Typ 3 (siehe Tabelle 3.1) sind gemäß dem Stand der Technik noch keine konkreten hybriden Systeme verfügbar. Allerdings existieren erste Ansätze, beispielsweise EtherCAT-Systeme um IEEE-802.11- oder IEEE-802.15.4-basierte Funkkomponenten zu erweitern. Dazu wird ein Gateway-Ansatz vorgeschlagen, der das EtherCAT-Protokoll im Gateway terminiert und für das Funksystem auf ein Funkprotokoll umsetzt [117]. Problematisch an diesem Ansatz ist die Übertragungslatenz der verwendeten Funkstandards, die insbesondere für mehrere Funkteilnehmer weitere Maßnahmen erfordert.

Unabhängig vom konkreten Industrial-Ethernet-System verbleibt aufgrund der auf das Übertragungsmedium zugeschnittenen und optimierten Protokolle der Systeme von Typ 3 nur eine Gateway-basierte Lösung, um Kommunikationssysteme miteinander zu koppeln. Entsprechend der konkreten Anforderungen kann dieser Ansatz entweder in einem Tunnel- oder einem Proxy-Modus realisiert werden. Die geringeren Aufwände für den ersten stehen der besseren Performance bei der Übertragungslatenz für den zweiten Modus gegenüber [118]. Ein weiterer Ansatz besteht darin, typische Eigenschaften wie Topologien und Protokolle der Typ 3-basierten Systeme zu analysieren und im Hinblick auf die Kopplung mit geeigneten Funkprinzipien zu systematisieren. Bei dieser Analyse erweisen sich verfügbare Funkstandards als nicht geeignet, sodass letztendlich für den Gateway-Ansatz alternative Technologien wie 5G, IEEE 802.11ax [119] oder idealtypische Eigenschaften eines Funksystems betrachtet werden müssen [120].

Die Protokollkonvertierung zwischen den Teilsystemen eines hybriden Kommunikationssystems ist charakteristisch für Gateway-basierte Lösungen. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit dieser Konvertierung kann ein abstraktes, von konkreten Protokollen unabhängiges Modell entwickelt und mittels Simulationen bewertet werden [121]. Dieses Modell kann zur Bewertung der Übertragungslatenz in kaskadierten hybriden Kommunikationssystemen genutzt werden [122].

### 3.5. Zusammenfassung

Will man abschließend die technische Bestandsaufnahme für den Einsatz von Funktechnik in der Automatisierungstechnik bewerten, so kann man zunächst feststellen, dass Funktechnik generell eine zunehmende Akzeptanz seitens des Maschinenbaus erfährt [6]. Im weiteren ist bereits eine wachsende Marktdurchdringung für Funkkomponenten bei industriellen Kommunikationssystemen von Herstellern zu verzeichnen [7] [8].

Am häufigsten werden Funkstandards und entsprechende Komponenten der IEEE 802.xx-Familie (siehe Abschnitt 3.3.1.1) eingesetzt, die in den lizenzfreien ISM-Bändern operieren. Der freien Nutzbarkeit in den ISM-Bändern stehen die normativen Anforderungen an Koexistenzfähigkeit und Fairness von Funksystemen gegenüber, die in ihrem Kern den Anforderungsprofilen industrieller Anwendungen der Feldebene widersprechen. Daher sorgen aufbauend auf IEEE-802.xx-basierten Funkstandards mitunter proprietäre Erweiterungen dafür, Funktechnologien auf dedizierte Anforderungen industrieller Anwendungen wie Sensor-Aktor-Netzwerke (siehe Abschnitt 3.3.3) auszulegen. Typischerweise umfassen diese Erweiterungen den Medienzugriff (siehe Abschnitt 3.3.2.1) sowie Verfahren zur Redundanzhöhung (siehe Abschnitt 3.3.2.2),

um damit eine deterministischere und robustere Datenübertragung zu erzielen.

Technologisch gesehen haben Mobilfunkstandards ab dem Entwicklungsstand von LTE (siehe Abschnitt 3.3.1.2.2) bereits viele Eigenschaften an Bord, um ein Funksystem für den Betrieb in industriellen Anwendungen der Feldebene zu qualifizieren. Stattdessen erweisen sich die Geschäftsmodelle von Netzbetreibern wie auch die Vergabe von Frequenzspektren durch die Regulierungsbehörden als weitere, nicht technische Herausforderungen (siehe Abschnitt 2.4.3).

Über regulatorische Belange hinaus sind mit URLLC erstmalig Anforderungen aus dem Bereich der Automatisierung in die Spezifikation des Mobilfunkstandards 5G eingeflossen [86] [87]. Vergleichbare Anforderungen sind auch in den Ausschreibungen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderprogramms *IKT 2020 – Forschung für Innovationen* [123] enthalten. Aus diesem Programm geht beispielsweise das Forschungsprojekt *ParSec* [124] hervor, das eine auf die Fertigungsautomatisierung zugeschnittene Bitübertragungsschicht eines Funksystems als Zielstellung formuliert.

Darüber hinaus ist unabhängig von der konkreten Ausführung einer Funktechnologie auch ihre Integration als Teilkomponente in ein bestehendes drahtgebundenes Kommunikationssystem zu berücksichtigen. Hier weist der Stand der Technik Lücken auf, insbesondere bei der Systematisierung und Modellierung hybrider Kommunikationssysteme, die auf Industrial-Ethernet-Systemen des *Typs 3* beruhen (siehe Abschnitt 3.4). Eben diese Systeme kommen zuvorderst bei industriellen Anwendungen der Feldebene zum Einsatz. Die Herausforderung besteht darin, diese zugeschnittenen und im Vergleich zu anderen Industrial-Ethernet-Systemen bisweilen hoch optimierten Systeme (siehe Abschnitt 3.2.2) so zu modellieren, dass das Anbinden weiterer Teilsysteme systematisch, effizient und nahtlos erfolgen kann.

Richtet man abschließend den Blick in die Zukunft, so scheint die Vision eines standardisierten hybriden Kommunikationssystems basierend auf der Kombination aus TSN seitens der drahtgebundenen und 5G seitens des funkbasierten Teilsystems im Bereich des Möglichen – zumindest adressiert 3GPP Release 16 und Release 17 mit Industrial IoT die Thematik. Zugleich lehrt der Blick in die Historie industrieller Kommunikationssysteme (siehe Abschnitt 3.1), dass dieser Weg zahlreichen Herausforderungen ausgesetzt ist und der Ausgang derzeit unvorhersehbar bleibt.

## 4. Zwischenfazit I

Mit Kapitel 4 wird ein Zwischenfazit zu Teil I der Arbeit gezogen, der den Problemraum der funkbasierten Kommunikation für industrielle Anwendungen auf Feldebene der Fertigungsautomatisierung adressierte.

Zu diesem Zweck erfolgt im nachfolgenden Abschnitt 4.1 zunächst eine abschließende Bewertung des Problemraumes, die sich aus der Summe von Problemstellung und Motivation (siehe Kapitel 1), Anforderungsanalyse (siehe Kapitel 2) und technischer Bestandsaufnahme (siehe Kapitel 3) zusammensetzt. Basierend auf diesen Ergebnissen werden Schlussfolgerungen gezogen und potenzielle Lösungsstrategien aufgezeigt. Diese bilden den Ausgangspunkt für Teil II der Arbeit, der sich dem Lösungsraum eines flexiblen, hybriden industriellen Kommunikationssystems widmet. In Abschnitt 4.2 wird die weitere Vorgehensweise hierfür beschrieben.

### 4.1. Einordnung und Bewertung

Mit der Anforderungsanalyse wurden charakteristische Anwendungsfälle für die Feldebene der Fertigungsautomatisierung herausgearbeitet, klassifiziert und von anderen Anwendungsfeldern der Automatisierungstechnik abgegrenzt. Ausgehend von diesen Anwendungen wurden die charakteristischen Anforderungen an ein industrielles Kommunikationssystem abgeleitet und in Form von Anforderungsprofilen und entsprechenden Profiltypen formuliert.

Neben diesen expliziten Anforderungen sind weiterhin implizite Kundenanforderungen bei der Bewertung eines Anforderungsprofils zu berücksichtigen. Beispielsweise wird ein Anforderungsprofil nicht unmittelbar im Hinblick auf eine bestimmte Kommunikationstechnologie, sei es ein Funksystem oder ein drahtgebundenes System, formuliert, sondern nimmt vielmehr das Kommunikationssystem als Ganzes in den Blick. Dies spiegelt den Black-Box-Gedanken im Sinne einer impliziten Kundenanforderung wider. Demgemäß sollte ein Kommunikationssystem seine Funktionalitäten gegenüber der eigentlichen Anwendung kapseln, während es intern ein flexibel auslegbares, hybrides Kommunikationssystem implementiert, das funkbasierte und drahtgebundene Teilsysteme miteinander verbindet. Geht man von heutigen, drahtgebundenen legacy Systemen aus, so sollten auch diese Systeme Mechanismen bereitstellen, um funkbasierte Teilsysteme nahtlos zu integrieren.

Ferner zeigt die weiterführende Analyse von Anwendungen mit dem Fokus auf Mobilität, dass man Anwendungen der Feldebene hinsichtlich ihrer beweglichen Maschinenteile in Sub-Systeme strukturieren kann. Mit dieser Strukturierung ergibt sich ein neuer Freiheitsgrad, gemäß dem ein industrielles Kommunikationssystem auslegt werden kann. Konkret können die Eigenschaften des Datenverkehrs innerhalb des Kommunikationssystems gewinnbringend geformt werden, was insbesondere für die Übertragung über die Luftschnittstelle genutzt werden kann. So kann der Datenverkehr einer Vielzahl von  $N$  Funkteilnehmern (Feldgeräten) eines Funksystems mit geringer Datenrate in den Datenverkehr einer geringeren Anzahl von

Tabelle 4.1.: Gewichtung von Funktionalitäten des Schichtenmodells in Bezug zu Anforderungen industrieller Anwendungen.

OSI-Schicht	Funktionalität	Jitter ( $\gamma$ )	Latenz ( $D_{x,n}, T_{re,n}$ )	Robustheit ( $PLR$ )	Datenrate ( $R_{app}$ )
Transport	Segmentation	-	-	○	-
	Fehlerschutz	-	○	●	○
Vermittlung	Routing	○	○	○	○
	Fragmentierung	-	-	○	-
Sicherung	Link Control	-	-	●	●
	Medienzugriff	●	●	-	○
Bitübertragung		●	●	●	●

$N'$  Funkteilnehmern (Sub-Systemen) größerer Datenrate transformiert werden.

Die Sub-System-basierte Grundidee bietet damit einen Lösungsansatz auch für gängige Funksysteme, deren Leistungsfähigkeit begrenzt ist, wenn viele Funkteilnehmer in kurzen zeitlichen Abständen Datenpakete einer geringen Größe übertragen. Diese für Funksysteme typische Leistungsbegrenzung gründet in der Art des Medienzugriffs, der bei vielen Funksystemen nicht deterministisch ausgelegt ist und folglich zu höheren, beziehungsweise nicht garantierten Übertragungslatenzen führt. Das Einhalten zeitlicher Schranken stellt hingegen eine der zentralen Anforderungen industrieller Anwendungen dar, wozu eine detaillierte Bewertung erfolgen muss (siehe Abschnitt 5.4.1 und Abschnitt 7.1.1).

Um einen systematisierten Zusammenhang zwischen Kommunikationssystem und Anforderungen der Feldebene aufzuzeigen, listet Tabelle 4.1 die einzelnen Kernfunktionalitäten eines Kommunikationssystem auf, ordnet sie den Schichten des ISO/OSI-Referenzmodells zu und stellt sie den konkreten Anforderungen industrieller Anwendungen (siehe Abschnitt 2.3.1) gegenüber. Jede Funktionalität wird gemäß ihrer Relevanz für die entsprechende Anforderung bewertet. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Bitübertragungs- und die Sicherungsschicht die entscheidenden Funktionalitäten für industrielle Kommunikationssysteme bereitstellen. Gemäß technischer Bestandsaufnahme vereint kein existierendes Funksystem alle Funktionalitäten derart, dass es als ganzheitliches industrielles Kommunikationssystem allen Anforderungsprofilen der Feldebene Genüge leistet.

Des weiteren deckt sich die Bewertung aus Tabelle 4.1 mit der Ausprägung des Protokollstapels drahtgebundener Industrial-Ethernet-Systeme, welche die oberen Schichten des Protokollstapels nicht implementieren (siehe Abschnitt 3.2.1.1). Betrachtet man andererseits kommerziell verfügbare Funksysteme und deren off-the-shelf Komponenten, so gilt die Einschränkung, dass diese üblicherweise erst auf der Protokollebene, gegebenenfalls auf Medienzugriffsschicht, modifiziert werden können. Die Bitübertragungsschicht ist durch Transceiver und Hochfrequenzbausteine zumeist als gegeben zu betrachten, wodurch die Leistungsfähigkeit eines Funksystems entscheidend vorgeprägt ist. Dieser Aspekt wird in Teil II der Arbeit tiefer-

gehend ausgearbeitet, indem zum einen die Leistungsfähigkeit existierender Funkstandards untersucht (siehe Abschnitt 7.1.1.1), zum anderen eine neuartige Bitübertragungsschicht als idealtypische Grundstruktur abgeleitet wird (siehe Abschnitt 7.1.1.2).

Neben dem Funksystem gilt Industrial Ethernet vom Typ 3 (siehe Tabelle 3.1) als de-facto Standard für den drahtgebundenen legacy Teil des hybriden Kommunikationssystems. Gemäß der technischen Bestandsaufnahme existiert keine Lösung, diese dedizierten legacy Systeme um funkbasierte Komponenten zu erweitern, sie nahtlos in ein legacy System zu integrieren und so ein ganzheitliches, hybrides industrielles Kommunikationssystem zu schaffen. In Teil II der Arbeit wird hierzu eine geeignete Systemarchitektur abgeleitet (siehe Abschnitt 6.4.2) und der Entwurf einer Koppelkomponente als Bindeglied zwischen den Sub-Systemen eines hybriden Kommunikationssystems erörtert (siehe Abschnitt 7.1).

In Summe lässt sich nach Analyse des Problemraums – bestehend aus Anforderungsanalyse und technischer Bestandsaufnahme – schlussfolgern, dass der Einsatz von Funktechnologie für industrielle Anwendungen der Feldebene ein wirtschaftlicher Erfolgsfaktor sein kann, der sich zum einen aus der Möglichkeit eines Business Enablers für neue Anwendungsfälle, zum anderen aus der Aussicht auf Kostenersparnis motiviert. Bis dato scheitert eine Umsetzung an der Leistungsfähigkeit vorhandener Funktechnologien. Darüber hinaus fehlt es an grundlegenden Konzepten für die Schaffung eines ganzheitlichen, hybriden industriellen Kommunikationssystems, das sowohl drahtgebundene legacy Komponenten als auch funkbasierte Komponenten als Teilsysteme berücksichtigt und diese Teilsysteme flexibel und gemäß ihrer Leistungsfähigkeit einzusetzen vermag. Mit der Ausarbeitung des Lösungsraums in Teil II der Arbeit wird diese Problemstellung adressiert.

## 4.2. Weitere Vorgehensweise

Die Zielstellung für Teil II dieser Arbeit liegt darin, den Lösungsraum für ein flexibles, hybrides industrielles Kommunikationssystem zu erarbeiten. Dazu werden folgende Arbeitspunkte schrittweise ausgeführt:

1. Zum Zweck der Systematisierung wird ein Schichtenmodell für industrielle Kommunikationssysteme eingeführt, das Systemmodell der zyklischen Kommunikation sowie Modelle für alle relevanten Parameter (siehe Kapitel 5).
2. Basierend auf den grundlegenden Modellen wird eine Systemarchitektur für das hybride Kommunikationssystem entwickelt. Dazu werden Konzepte für die funkbasierte Übertragung als auch für Anbindung und Kopplung von Teilsystemen erarbeitet und evaluiert (siehe Kapitel 6).
3. Ausgehend von der Systemarchitektur erfolgt der verfeinerte Entwurf der Systemkomponenten und Querschnittsfunktionen des Kommunikationssystems. Der Schwerpunkt liegt auf der analytischen Bewertung der Leistungsfähigkeit der untersuchten Lösungsansätze, wofür die Parametermodelle aus Schritt 1 genutzt werden (siehe Kapitel 7).
4. Mittels Fallstudien und Anwendungsbeispielen wird die Funktionsweise des hybriden Kommunikationssystems validiert. Dazu realisiert eine Demonstrator-Plattform die Umsetzung eines hybriden Kommunikationssystems mit funkbasierten Standardkomponenten (siehe Kapitel 9). Basierend auf diesem Demonstrator wird ein Simulationsmodell

entwickelt, mit dem die Grenzen der Leistungsfähigkeit bestehender Funksysteme mittels Simulation ermittelt und darüber hinaus durch proprietäre Erweiterungen verifiziert werden (siehe Kapitel 10).



## **Teil II.**

# **Modellbildung und Systematisierung**

## 5. Modellbildung für die Feldebene

Ziel dieses Kapitels ist es, das Modell eines industriellen Kommunikationssystems der Feldebene zu bilden und dieses zu systematisieren. Dazu wird das Kommunikationssystem als Teilsystem industrieller Anwendungen betrachtet und von der eigentlichen Anwendung durch Systemgrenzen – entsprechende Schnittstellen – im Kontext abgegrenzt. Innerhalb des Kommunikationssystems werden unabhängig von der konkreten Übertragungstechnologie sowohl drahtgebundene als auch funkbasierte Sub-Systeme betrachtet und hinsichtlich ihrer wesentlichen Systemeigenschaften und Parameter modelliert.

Zur Ausarbeitung des Kommunikationsmodells werden im folgenden Abschnitt 5.1 zunächst die für diese Arbeit grundlegenden Begriffe eingeführt. Basierend darauf werden in den Abschnitten 5.2 und 5.3 ein Schichten- und ein Systemmodell für industrielle Kommunikationssysteme gebildet. Die Systematisierung der zugehörigen Parametermodelle erfolgt in Abschnitt 5.4, bevor eine Bewertung der aufgestellten Modelle in Abschnitt 5.5 dieses Kapitel abschließt.

### 5.1. Vorbetrachtungen

Um die in dieser Arbeit aufgestellten Modelle systematisieren und einheitlich bezeichnen zu können, werden im folgenden Definitionen zum serviceorientierten Schichtenmodell wiedergegeben beziehungsweise zu allgemeinen Kommunikationsprinzipien eingeführt.

In der Computertechnik ist der Gebrauch eines Schichtenmodells gängige Praxis. Dabei stellt eine Schicht  $N$  einer überliegenden Schicht  $N + 1$  einen bestimmten Dienst (Service) zur Verfügung. Ist Schicht  $N$  der Dienstanbieter (Service Provider), so greift Schicht  $N + 1$  als Dienstanutzer (Service User) auf den Service von Schicht  $N$  zu. Dieser Zugriff erfolgt über die Service Access Point (SAP) mittels sogenannter Dienstelemente (Service Primitives) [125].

Zusammen mit dem Schichtenmodell werden in dieser Arbeit weiterhin Mechanismen wie das Client-Server- und das Producer-Consumer-Modell als grundlegende Kommunikationsprinzipien zur Modellierung genutzt. Abbildung 5.1 zeigt, wie das Client-Server-Modell nach Abbildung 5.1a im Syntax des Schichtenmodells mittels der Service Primitives auf einen Confirmed Service und das Producer-Consumer-Modell nach Abbildung 5.1b auf einen Unconfirmed Service abgebildet werden können.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass mit dem Client-Server- als auch unter dem Producer-Consumer-Modell grundlegende Kommunikationsprinzipien bezeichnet werden, die klar von Medienzugriffsverfahren zu unterscheiden sind. Mit dieser Festlegung soll einer Vermengung von Fachbegriffen, wie beispielsweise zwischen dem Client-Server-Prinzip oder dem Master-Slave-Prinzip, vorgebeugt werden:

- In diesem Sinne stellt das Master-Slave-Prinzip ein Medienzugriffsverfahren dar, das konkret der Sicherungsschicht gemäß ISO/OSI-Referenzmodell zuzuordnen ist.

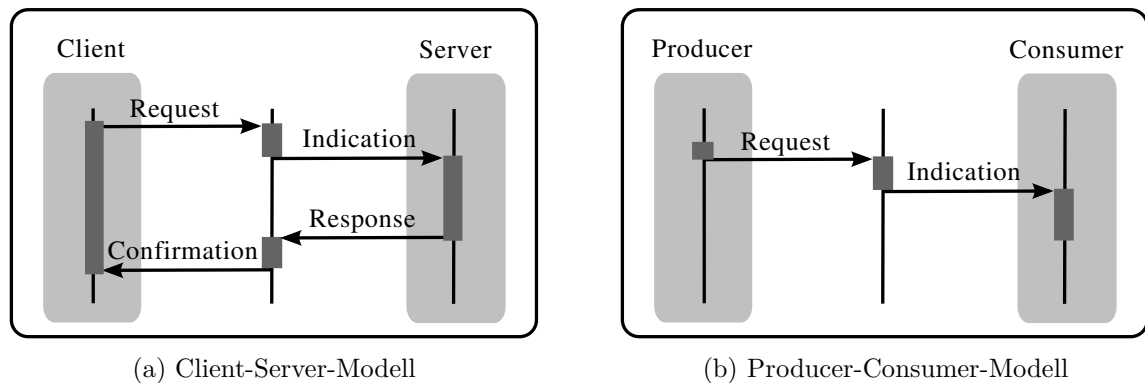


Abbildung 5.1.: Kommunikationsprinzipien im serviceorientierten Schichtenmodell.

- Das Client-Server-Prinzip beschreibt ein grundlegendes Prinzip im Sinne eines Architekturmusters, das unabhängig der Zugehörigkeit zu einer konkreten OSI-Schicht umgesetzt werden kann.

## 5.2. Schichtenmodell der Feldebene

Aufbauend auf den Vorbetrachtungen zum serviceorientierten Schichtenmodell und den grundlegenden Kommunikationsprinzipien wird in diesem Abschnitt das Schichtenmodell für industrielle Kommunikationssysteme der Feldebene eingeführt. Das Modell besteht im Kern aus zwei Bestandteilen, einer Anwendungsschicht und einer Kommunikationsschicht. Abbildung 5.2a veranschaulicht dieses Modell bestehend aus Kommunikations- und Anwendungsschicht, verbunden durch den SAP der Kommunikationsschicht.

### 5.2.1. Kommunikationsschicht

Um die charakteristischen Anforderungen industrieller Anwendungen erfüllen zu können, sind gemäß Zwischenfazit I (siehe Abschnitt 4.1) zuvorderst die Bitübertragungs- und die Sicherungsschicht maßgeblich. Dies spiegelte sich bereits in der Ausprägung des Protokollstapels drahtgebundener Industrial-Ethernet-Systeme wieder. Weiterführend dazu wird in diesem Abschnitt ein allgemeines Modell der Kommunikationsschicht eingeführt.

Zunächst trägt Abschnitt 5.2.1.1 dem Servicegedanken Rechnung, indem das Servicemodell der Kommunikationsschicht beschrieben wird, das der Anwendungsschicht zur Verfügung steht. In Abschnitt 5.2.1.2 werden schließlich die der Kommunikationsschicht innewohnenden Elemente modelliert.

#### 5.2.1.1. Service der Kommunikationsschicht

Im serviceorientierten Schichtenmodell einer industriellen Anwendung stellt die Anwendungsschicht den Service User dar, die Kommunikationsschicht entsprechend den Service Provider. Über ihren SAP bietet die Kommunikationsschicht ihren Service an. Der Service besteht darin, eine logische Verbindung zwischen den Kommunikationspartnern auf Anwendungsebene bereitzustellen. Ein Kommunikationspartner stellt den Requester dar, der andere den Acceptor.

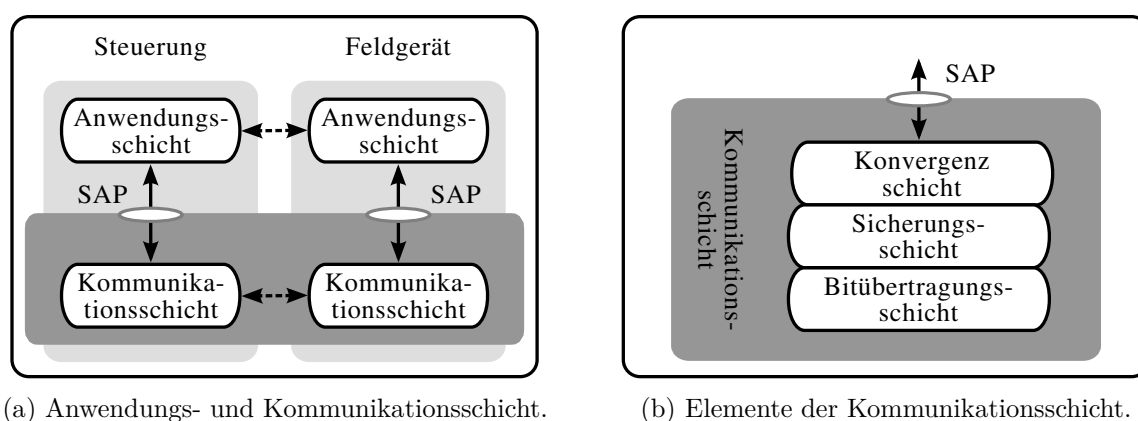


Abbildung 5.2.: Schichtenmodell der Feldebene.

Abbildung 5.2a veranschaulicht eine statische Ansicht von Kommunikationsschicht, Anwendungsschicht und dem SAP dazwischen. Eine dynamische Ansicht der Kommunikationsschicht stellt das Sequenzdiagramm in Abbildung 5.5 dar, das im Kontext der zyklischen Kommunikation näher betrachtet wird. Als Kommunikationsprinzip liegt den logischen Verbindungen das Producer-Consumer-Modell zugrunde. Im assoziierten Modell repräsentiert der Requester den Producer einer Verbindung, der Acceptor den Consumer.

### 5.2.1.2. Elemente der Kommunikationsschicht

Die Kommunikationsschicht setzt sich aus drei Elementen zusammen, der physikalischen Bitübertragungsschicht, der Sicherungsschicht und der Konvergenzschicht. Abbildung 5.2b veranschaulicht die Zusammensetzung der einzelnen Elemente.

Die Bitübertragungsschicht gewährleistet die physikalische Verknüpfung der Geräte, sei es über Funk oder ein drahtgebundenes Medium. Die Sicherungsschicht übernimmt unter anderem die Regelung für den Zugriff auf das durch die Bitübertragungsschicht bereitgestellte Übertragungsmedium, das die Bitübertragungsschicht ihrerseits als Service über seinen SAP zur Verfügung stellt.

Die resultierenden Bus- beziehungsweise Medienzugriffsverfahren der Sicherungsschicht stellen für drahtgebundene industrielle Kommunikationssysteme häufig ihre Kerncharakteristik dar. Genannt seien beispielsweise die Bus-Arbitrierung bei Controller Area Network (CAN) oder das Summenrahmenprotokoll bei sercos III. Auch für existierende, funkbasierte Systeme sind Bitübertragungs- und Sicherungsschicht typischerweise standardisiert, wie beispielsweise bei der IEEE-802.xx-Familie.

Beim Schichtenmodell von Industrial-Ethernet-Systemen bleiben die Schichten über der Sicherungsschicht typischerweise unbesetzt. Für das in dieser Arbeit vorgeschlagene Schichtenmodell eines industriellen, echtzeitfähigen Kommunikationssystems liegt gemäß Abbildung 5.2b über der Sicherungsschicht eine Konvergenzschicht. Gegebenenfalls bleibt die Konvergenzschicht für bestehende Industrial-Ethernet-Systeme unbesetzt. Im Falle eines hybriden industriellen Kommunikationssystems, das aus mehreren Sub-Systemen besteht, ist es die Aufgabe dieser

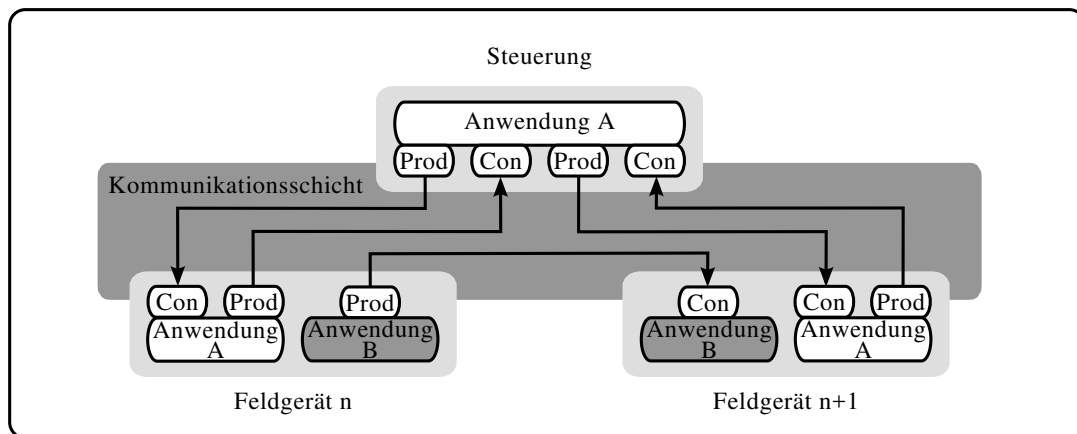


Abbildung 5.3.: Producer-Consumer-Modell bei sercos III (in Anlehnung an [4]).

Konvergenzschicht, die Sub-Systeme zu koppeln. Hierzu erfolgt in Abschnitt 6.3 eine systematische Analyse der potenziellen Anbindungskonzepte.

### 5.2.2. Anwendungsschicht

Im Abschnitt 2.2 wurden bereits charakteristische Anwendungen der Feldebene der Fertigungsautomatisierung, deren Komponenten und Eigenschaften diskutiert. Dieser Abschnitt erweitert die Betrachtungen hinsichtlich des Schichtenmodells der Feldebene.

#### 5.2.2.1. Logische Geräteverbindungen

Gemäß Abschnitt 5.2.1 stellt die Kommunikationsschicht im Schichtenmodell der Feldebene der Anwendungsschicht logische Verbindungen nach dem Producer-Consumer-Prinzip zur Verfügung. Nach diesem Modell sind logische Verbindungen prinzipiell zwischen allen Gerätetypen möglich. Der typische Anwendungsfall ist die Verbindung von Steuerung und Feldgerät. Möglich sind jedoch auch direkte Verbindungen zwischen Feldgeräten oder zwischen verschiedenen Steuerungen.

#### Beispiel: Logische Geräteverbindungen bei sercos III

Abbildung 5.3 veranschaulicht am Beispiel des Industrial-Ethernet-Systems sercos III, wie logische Geräteverbindungen zwischen den Geräten einer oder mehrerer Anwendungen aufgespannt werden. Diese Verbindungen werden durch ein Producer-Consumer-Modell abgebildet [5].

Die dargestellten Anwendungen bestehen aus einer Steuerung und zwei Feldgeräten. Die Steuerung spannt für ihre Anwendung A zu beiden Feldgeräten je zwei logische Verbindungen – eine als Producer und eine als Consumer. Im Kontext einer Regelschleife werden über den steuerungsseitigen Producer die Sollwerte einer Anwendung an die Consumer der Feldgeräte übertragen. Entsprechend werden über die steuerungsseitigen Consumer die Istwerte empfangen. Darüber hinaus beinhaltet das dargestellte Beispiel eine logische Querverbindung zwischen den Feldgeräten. Über diese logische Querverbindung können für Anwendung B Sollwerte, Istwerte oder jedwede andere Datenform direkt zwischen den Feldgeräten ausgetauscht werden.

### 5.2.2.2. Offene und Geschlossene Regelkreise

Die Betriebsarten von Regelkreisen wurden bereits in Abschnitt 2.2.1 beschrieben. Es wird zwischen zwei grundlegenden Betriebsarten differenziert – offenen und geschlossenen Regelkreisen. Beim offenen Regelkreis übernimmt die Steuerung Steuerungsaufgaben ohne die Informationsgewinn aus dem Rückkanal. Beim geschlossenen Regelkreis übernimmt die Steuerungskomponente Regelungsaufgaben unter Berücksichtigung der Istwerte über den Rückkanal.

Im Hinblick auf die Kommunikationspartner der logischen Geräteverbindungen stellt im Falle eines geschlossenen Regelkreises die Steuerung sowie jedes beteiligte Feldgerät sowohl einen Producer als auch einen Consumer für die Verbindungen bereit. Das Fallbeispiel in Abbildung 5.3 veranschaulicht diese Konstellation für Anwendung A. Im Falle eines offenen Regelkreises implementiert typischerweise die Steuerung lediglich die Producer, die Feldgeräte entsprechend die Consumer der logischen Geräteverbindungen.

## 5.3. Systemmodell der Feldebene

Basierend auf dem Schichtenmodell wird im folgenden das Systemmodell für die industrielle Kommunikation definiert. Zunächst werden die Topologien der Feldebene und deren Auswirkung auf die Modellbildung betrachtet. Ferner wird das Systemmodell der zyklischen Kommunikation eingeführt, das charakteristisch für industrielle Anwendungen der Feldebene ist und Grundlage für die weiteren Betrachtungen darstellt.

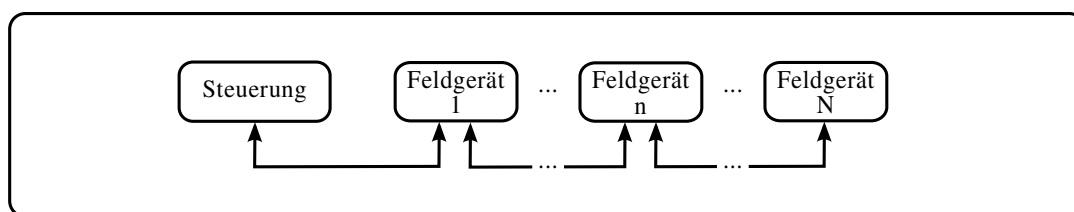
### 5.3.1. Topologien der Feldebene

In der Automatisierungstechnik beschreibt der Begriff der *Topologie*, wie (Feld-)Geräte einer industriellen Anwendung über ein Kommunikationssystem miteinander verbunden sind. Im Bezug auf das ISO/OSI-Referenzmodell stellen Topologien eine Ausführungsform der Bitübertragungsschicht dar. Abbildung 5.4 illustriert die gängigen Topologien für drahtgebundene industrielle Kommunikationssysteme.

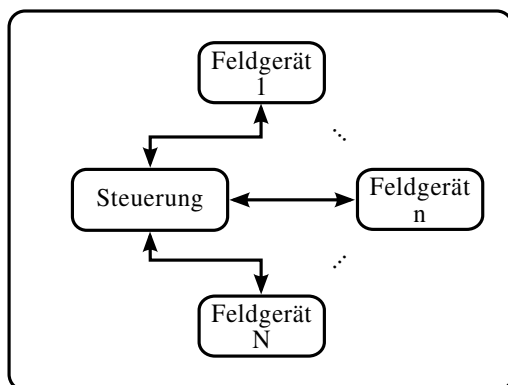
Die Sterntopologie gemäß Abbildung 5.4b repräsentiert die ursprüngliche Form industrieller Kommunikationssysteme, bei der Geräte über Einzelverdrahtung an eine zentrale Komponente, häufig die Steuerung, angebunden werden. Mit dem Aufkommen der Feldbussysteme wurde diese Ausführungsform durch Linien- und Ringtopologien gemäß Abbildung 5.4a und Abbildung 5.4c im Wesentlichen abgelöst. Für beide Ausführungsformen ist es zuvorderst die Aufgabe des Bus- beziehungsweise des Medienzugriffsverfahrens, die einzelnen Geräte anzubinden und deren Datenfluss über das Übertragungsmedium zu regeln.

Bei strikter Beschränkung des Topologiebegriffs auf die Bitübertragungsschicht ergeben sich für die funkbasierte Datenübertragung lediglich die Sterntopologie oder komplexere vermaschte Strukturen als praktikable Ausführungsformen. In Rahmen dieser Arbeit werden vermaschte Strukturen nicht weiter betrachtet, da sie aufgrund ihrer mehrfachen Hops zwischen Send- und Empfangsknoten nicht für die zeitkritischen Anforderungen industrieller Anwendungen der Feldebene geeignet sind.

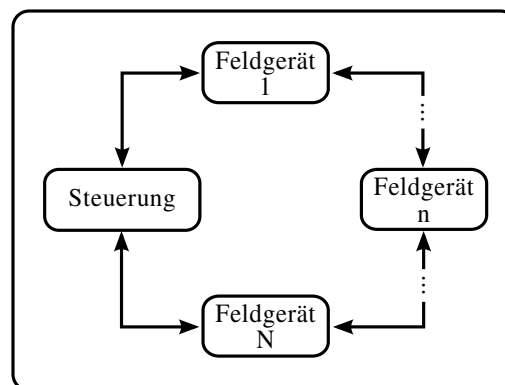
Aus dem Blickwinkel der Modellbildung ist festzuhalten, dass die Topologie einer industriellen Anwendung beschreibt, wie einzelne Geräte auf Ebene der Bitübertragungsschicht miteinander



(a) Linientopologie.



(b) Sterntopologie.



(c) Ringtopologie.

Abbildung 5.4.: Typische Topologien auf Feldebene der Fertigungsautomatisierung.

verbunden sind. Durch den Protokollstapel der Kommunikationsschicht wird diese Topologie soweit abstrahiert, dass der Anwendungsschicht mittels des SAP der Kommunikationsschicht eine logische Verbindung der Geräte präsentiert wird.

### 5.3.2. Modell der Zyklischen Kommunikation

Die *zyklische Kommunikation* stellt die Kerneigenschaft eines industriellen Kommunikationssystems der Feldebene dar. Folglich muss die Kommunikationsschicht die zyklische Kommunikation als Service zur Verfügung stellen. Die Güte dieses Service ist maßgeblich, ob die Regelkreise einer industriellen Anwendung ausgeführt werden können.

Abbildung 5.5 veranschaulicht die zyklische Kommunikation am Beispiel eines geschlossenen Regelkreises zwischen Steuerung und Feldgerät. Das Sequenzdiagramm stellt das Kommunikationssystem als Black-Box dar und fokussiert auf die Nachrichten am SAP zwischen Steuerung und Feldgerät. Die dargestellten Nachrichten entsprechen den Primitives des serviceorientierten Schichtenmodells der Feldebene. Darüber hinaus setzt Abbildung 5.5 das Aufspannen einer logischen Verbindung zwischen Steuerung und Feldgerät in Beziehung zu einer Zeitscheibe. Diese Zeitscheibe ist gemäß Abbildung 5.5 durch die Periodendauer der zyklischen Kommunikation mit Zykluszeit  $T_{cyc}$  definiert. Bei Motion-Control-basierten Anwendungen vom Profiltyp (c) wird der Regelungstakt der Anwendung – sprich die Aktualisierungszeit  $T_{up}$  – mit dem Bustakt des Kommunikationssystems – sprich der Zykluszeit  $T_{cyc}$  – gleich gesetzt. Daraus resultiert

$$T_{up} = T_{cyc} . \quad (5.1)$$

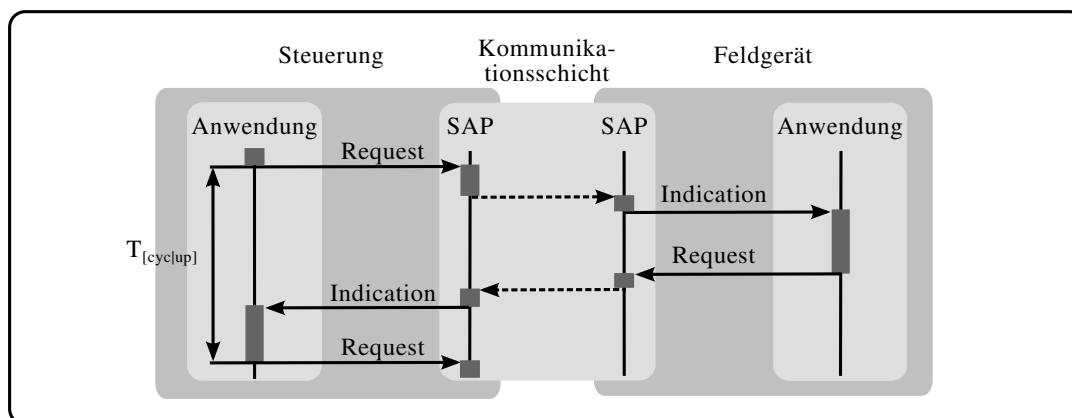


Abbildung 5.5.: Zyklische Kommunikation – charakteristische Übertragungsart industrieller Anwendungen der Feldebene.

Die Zeitbasis, auf der die Zeitscheibe der zyklischen Kommunikation beruht, leitet sich von der zentralen Steuerung ab und wird den Kommunikationspartnern durch dedizierte Synchronisationsmechanismen aufgeprägt (siehe Abschnitt 5.4.2). Haben alle Kommunikationspartner die gleiche Zeitbasis, so muss ein Kommunikationssystem für einen geschlossenen Regelkreis pro Kommunikationszyklus und pro Feldgerät mindestens zwei logische Verbindungen bereitstellen, um die Soll- und Istwerte der Producer zu den Consumern der Anwendung zu übertragen.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Reihenfolge der Übertragung von Soll- und Istwerten im Kommunikationszyklus frei wählbar ist. Die Festlegung hat lediglich Einfluss darauf, in welcher absoluten zeitlichen Lage der Kommunikationszyklus bezogen auf den Regelungstakt der Anwendung liegt.

## 5.4. Parametermodelle des Kommunikationssystems

Im Zuge der Anforderungen an die QoS wurden in Abschnitt 2.3.1 mit Reaktionszeit, Jitter und Paketverlustrate die relevanten Kenngrößen eines industriellen Kommunikationssystems beschrieben. In diesem Abschnitt werden Parametermodelle zu den Kenngrößen entwickelt, sodass die Modelle zur weiterführenden Analyse und Evaluierung genutzt werden können.

### 5.4.1. Latenz der Übertragung

Im folgenden werden die einzelnen Bausteine des industriellen Kommunikationssystems – Übertragungsstrecken und Laufzeiten innerhalb von Systemkomponenten – hinsichtlich ihrer Latenz für die Datenübertragung betrachtet. Für die Untersuchung der Latenz wird eine Linientopologie für die drahtgebundene Übertragung gemäß Abbildung 5.6a, beziehungsweise eine Sterntopologie für die funkbasierte Übertragung gemäß Abbildung 5.6b betrachtet. In beiden Fällen verbindet das Übertragungssystem eine zentrale Steuerung mit  $N$  Feldgeräten.

Gemäß der zyklischen Kommunikation nach Abbildung 5.5 überträgt eine Steuerung zu Beginn eines Kommunikationszyklus Sollwerte an die Feldgeräte und sammelt im Anschluss Istwerte ein. Da die Kommunikationsschicht ein zeitgesteuertes System darstellt, setzt der SAP der Kommunikationsschicht voraus, dass zum Start eines Kommunikationszyklus die Anwendung



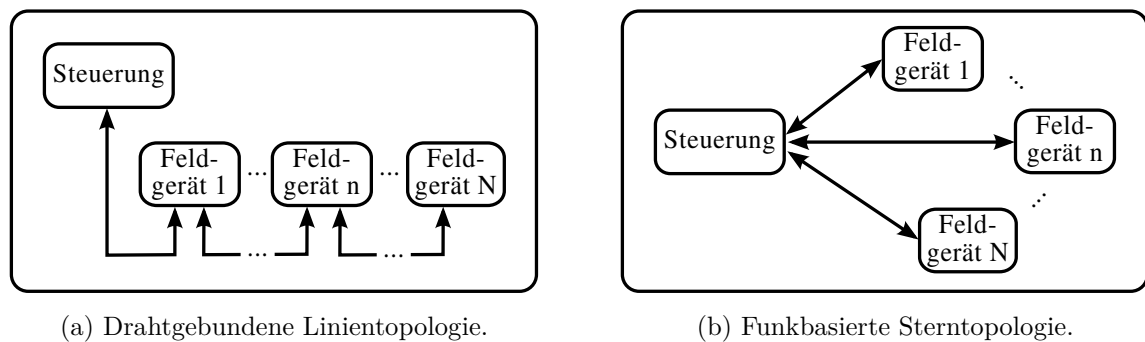


Abbildung 5.6.: Topologien zur Latenzmodellierung.

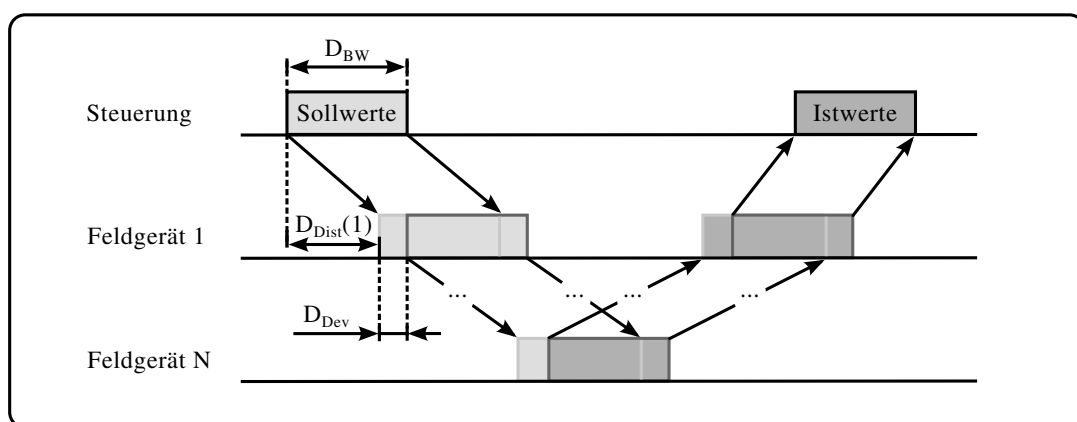


Abbildung 5.7.: Latenzmodellierung der drahtgebundenen Übertragung für Industrial-Ethernet-Systeme vom Typ 3.

durch ihre Datenflusskontrolle dafür Sorge trägt, dass dem Kommunikationssystem Sollwerte für alle Feldgeräte zur Verfügung stehen. In gleicher Weise stellt die Anwendungsschicht eines Feldgerätes sicher, dass ihrem SAP die entsprechenden Istwerte bereitgestellt werden.

#### 5.4.1.1. Drahtgebundene Übertragung

Für die Latenzmodellierung drahtgebundener Datenübertragung werden Industrial-Ethernet-basierte Systeme betrachtet. Der Fokus liegt insbesondere auf Systemen des Typs 3. Kennzeichnend für diese Klasse von Industrial-Ethernet-Systemen ist

- zum einen, dass obere Schichten des ISO/OSI-Referenzmodells – somit auch die Konvergenzschicht – des industriellen Kommunikationsmodells für die Feldebene nicht besetzt sind,
- zum anderen, dass die Sicherungsschicht dedizierte Hardwareerweiterungen über den Standard IEEE 802.3 hinaus implementiert.

Abbildung 5.7 veranschaulicht die Latenz der Datenübertragung für ein Industrial-Ethernet-System des Typs 3 in Form eines Weg-Zeit-Diagramms. Die Übertragungslatenz wird dabei durch drei wesentliche Faktoren bestimmt: die Bandbreite  $BW$  des Übertragungsmediums, die Leitungslänge  $Dist$  der drahtgebundenen Verbindungen und die Durchlaufzeiten  $D_{Dev}$  in den

Geräten.

Für die Sollwert-Übertragung ergibt sich eine resultierende Übertragungsverzögerung  $D_{c,N}$  für das letzte Feldgerät  $N$  einer Linientopologie

$$D_{c,N} = (N - 1) \cdot D_{Dev} + D_{Dist}(N) + D_{BW}(N, s_{App}). \quad (5.2)$$

Hierbei enthält Gleichung (5.2) die Vereinfachung, dass die Nutzdaten  $s_{App}$  pro Feldgerät gleich groß sind, womit für die Summe  $S_{App}$  der Nutzdaten aller  $N$  Feldgeräte gilt  $S_{App} = N \cdot s_{App}$ . Diese Annahme ist für eine Vielzahl industrieller Anwendungen valide, insbesondere für Maschinen und Antriebsregelungen der Feldebene. Für eine Herleitung von Gleichung (5.2) sei auf Anhang D verwiesen, für eine Auflistung der relevanten Parameter konkret auf Tabelle D.1.

Eine äquivalente Analyse hält auch für die Verzögerung bei der Istwert-Übertragung  $D_{a,N}$  vom letzten Feldgerät  $N$  einer Linientopologie zur Steuerung. Unter der Annahme gleicher Nutzdatengröße für Soll- und Istwerte gilt dann  $D_{a,N} = D_{c,N}$ .

Im Kontext des verfeinerten Systementwurfs erfolgen hierzu weiterführende Analysen für das Industrial-Ethernet-System sercos III – insbesondere im Hinblick auf die Verwendbarkeit und Kopplung mit funkbasierten Komponenten.

#### 5.4.1.2. Funkbasierte Übertragung

Für die Latenzmodellierung der funkbasierten Datenübertragung wird eine Sterntopologie gemäß Abbildung 5.6b betrachtet. Die zentrale Komponente der Sterntopologie ist die Steuerung – im weiteren auch das sogenannte Koppelement –, die eine direkte Funkverbindung zu allen  $N$  Feldgeräten besitzt.

Bezogen auf die Latenzbetrachtungen zur drahtgebundenen Datenübertragung finden sich Teilaspekte daraus bei der funkbasierten Übertragung wieder. So erfährt ein per Funk übertragenes Signal eine Ausbreitungsverzögerung  $D_{Dist}$  und ein Datenpaket die Übertragungsverzögerung  $D_{BW}$ , die im Verlaufe dieses Abschnitts genauer modelliert werden. Andererseits, da per Funk kommunizierende Komponenten direkt mit ihrer Gegenstelle verbunden sind, entfällt die Gerätedurchlaufzeit, die bei drahtgebunden Feldgeräten in Linientopologie zu berücksichtigen ist.

##### 5.4.1.2.1. Medienzugriffsverfahren

Weiterhin kommen im Gegensatz zu den betrachteten drahtgebundenen Industrial-Ethernet-Systemen bei Funksystemen häufig wettbewerbsorientierte Medienzugriffsverfahren zum Einsatz, die eine zusätzliche Verzögerung nach sich ziehen. Diese aus dem Medienzugriff resultierende Verzögerung wird im folgenden als  $D_{MAC}$  modelliert. Hier besteht eine starke Abhängigkeit vom eingesetzten Funkstandard und dessen zugrunde liegendem Medienzugriffsverfahren.

Der Fokus der Analyse liegt auf zeitbasierten Medienzugriffsverfahren, deren grundlegende Verfahren in Abbildung 5.8 aufgeführt sind. Betrachtet wird die Übertragung eines Datenpakets durch eine Funkkomponente, beispielsweise die Übertragung von Istwerten eines Feldgerätes an eine Steuerung. Des weiteren wird ein Funksystem im Halbduplex-Betriebsmodus angenommen,

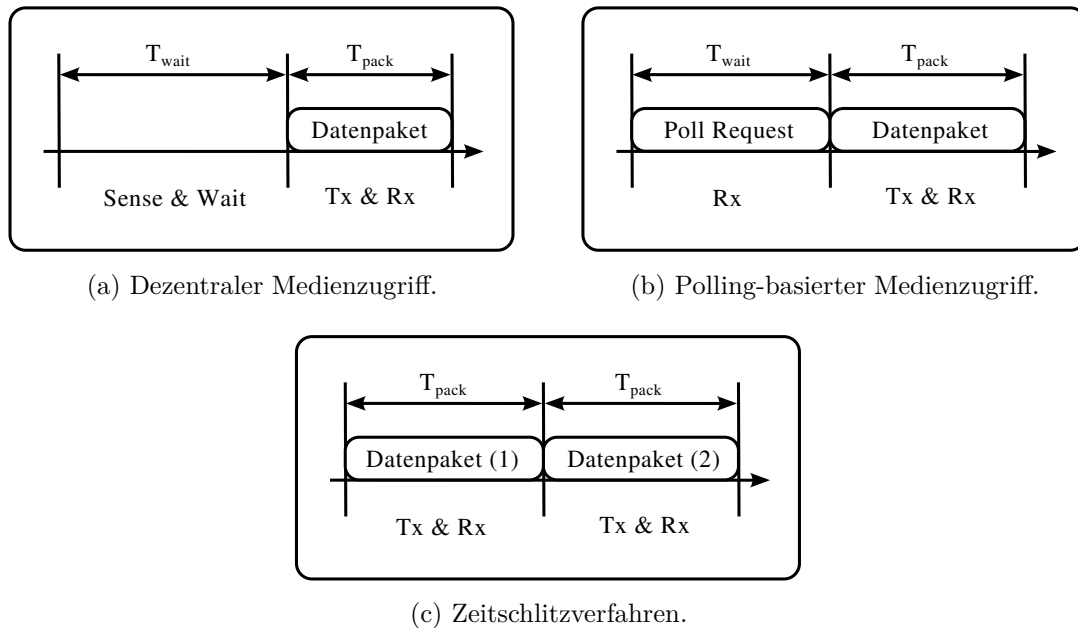


Abbildung 5.8.: Modelle funkbasierter Medienzugriffsverfahren.

das heißt eine Funkkomponente kann entweder Senden, oder Empfangen, nicht aber beides zugleich. Beim Senden oder Empfangen steht jeweils die gesamte Bandbreite des Funksystems zur Verfügung. Die hier getroffenen Annahmen spiegeln sich allesamt bei Funksystemen wider, die bereits in industriellen Kommunikationssystemen eingesetzt werden (siehe Abschnitt 3.3).

### Dezentral organisierter Medienzugriff

Abbildung 5.8a zeigt das Grundschaema des dezentralen, wettbewerbsorientierten Medienzugriffs, bei dem alle Funkteilnehmer des Systems gleichberechtigt auf das Übertragungsmedium zugreifen können. Kollisionen sollen zum einen erkannt, besser noch vermieden werden. Dazu werden Verfahren wie Carrier Sensing oder Listen Before Talk eingesetzt. Zudem soll der Zugriff auf das Übertragungsmedium fair zwischen allen Funkteilnehmern erfolgen. Das wiederum wird durch Randomisierung, sprich zufällige Wartezeiten, realisiert. Folglich wird bei diesem Medienzugriffsverfahren eine zufällige Zeitdauer  $T_{wait}$  abgewartet, bis ein Datenpaket der Dauer  $T_{pack}$  versendet werden kann, wobei es beim Übertragungsversuch selbst immer noch zu Kollisionen kommen kann. Die Zusammensetzung von  $T_{wait}$  wie auch  $T_{pack}$  hängt von dem konkreten Funkverfahren ab.

### Zentral geregelter Medienzugriff

Die beiden anderen in Abbildung 5.8 dargestellten Verfahren ordnen sich dem zentral geregelten Medienzugriff zu. Abbildung 5.8b modelliert ein Polling-basiertes Verfahren. Das heißt, ein Feldgerät wartet so lange ab, bis es von der Steuerung per *Poll Request* explizit aufgefordert wird, ein Datenpaket zu übertragen. Für die Latenzmodellierung ist somit neben der Paketdauer  $T_{pack}$  die Pollingdauer  $T_{poll}$  für das Poll Request zu berücksichtigen.

Abbildung 5.8c stellt schließlich ein TDMA-basiertes Medienzugriffsverfahren dar. Hier ist bereits vorab per Protokoll für jedes Feldgerät und seine Funkkomponente ein fester Zeitschlitz

reserviert. Damit reduziert sich die Übertragungsdauer für ein Datenpaket auf die reine Paketdauer  $T_{Pack}$ . Andererseits, setzt TDMA im Gegensatz zu den anderen hier betrachteten Verfahren eine Synchronisation aller Funkkomponenten voraus, sodass Zeitschlitze überhaupt genutzt werden können und das Datenpaket (1), von Feldgerät  $k$ , nicht mit dem Datenpaket (2), von Feldgerät  $l$ , interferiert. Für die durch den Medienzugriff verursachte Verzögerung  $D_{MAC}$  ergibt sich schließlich

$$D_{MAC} = \begin{cases} T_{Wait} & \text{bei dezentral geregeltem,} \\ T_{Poll} & \text{bei Polling-basierten,} \\ 0 & \text{bei TDMA-basiertem Medienzugriff.} \end{cases} \quad (5.3)$$

Das heißt ein TDMA-basierter Ansatz kommt hinsichtlich der durch den Medienzugriff verursachten Latenz ohne zusätzliche Verzögerung aus, ein Polling-basierter Ansatz garantiert eine feste Verzögerung, während ein dezentral organisierter Medienzugriff zu zufälligen Wartezeiten führt.

#### Beispiel: Das Medienzugriffsverfahren EDCA nach IEEE 802.11n

Abbildung 5.9 zeigt die Wirkweise des unregelmäßigen und wettbewerbsorientierten Medienzugriffsverfahrens EDCA nach IEEE 802.11n. Hier können Daten priorisiert werden, indem sie Verkehrsklassen (AC) zugeordnet werden. Mittels dieser Klassifizierung werden die Wartezeiten  $T_{Wait}$  parametrisiert. Im konkreten Beispiel von EDCA setzt sich die Wartezeit vor Übertragung eines Datenpakets aus zwei Bestandteilen zusammen

$$T_{Wait} = AIFS[AC] + BO[AC]. \quad (5.4)$$

Dabei ist  $AIFS[AC]$  das sogenannte *Arbitrary InterFrame Space*, das mit der AC parametrisiert wird. Damit wird die Zeitdauer beschrieben, die eine Funkkomponente in jedem Fall warten muss, sobald das Übertragungsmedium unbelegt ist. Zusätzlich kommt die zufällige, wiederum von der AC abhängige Backoff-Zeit  $BO$  hinzu

$$BO[AC] = k \cdot T_{Slot} \quad k \in [0, CW[AC]], \quad (5.5)$$

mit der Slot Time  $T_{Slot}$  und dem Wettbewerbsfenster (Contention Window)  $CW[AC]$ . Für die initiale Übertragung wird das Contention Window auf den minimalen Wert  $CW_{min}[AC]$  gesetzt. Schlägt eine Übertragung fehl so wird für die Wiederholung der Übertragung ein neues  $CW$  bestimmt

$$CW = 2 \cdot (CW + 1) - 1, \quad (5.6)$$

wobei das Contention Window durch  $CW_{max}[AC]$  nach oben begrenzt wird

$$CW = \max(CW, CW_{max}[AC]). \quad (5.7)$$

#### 5.4.1.2.2. Asymmetrie der Übertragungsstrecke

Weiterhin weist die funkbasierte Übertragung einen signifikanten Unterschied zum drahtgebundenen Industrial Ethernet auf. Während Industrial-Ethernet-Systeme im Kontext des Summenrahmenprotokolls die Nutzdaten – die Soll- und Istwerte – mehrerer Feldgeräte in einem Ethernet-Datenpaket aggregieren, ist dieser Ansatz für funkbasierte Verfahren nicht eins zu eins übertragbar. Zwar erlaubt die Sollwert-Übertragung die Verteilung der Sollwerte von der

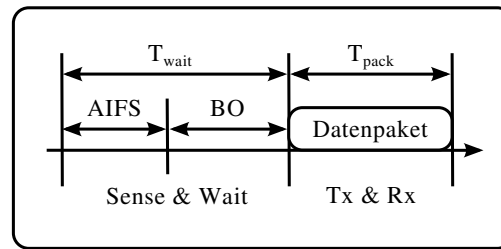


Abbildung 5.9.: Grundprinzip des Medienzugriffsverfahrens EDCA nach IEEE 802.11n.

Steuerung zu allen  $N$  Feldgeräten als Broadcast (siehe Abschnitt 6.2.2.2). Für die Gegenstrecke der Istwert-Übertragung gestaltet sich das Bündeln von Nutzdaten einzelner Funkteilnehmer hingegen als schwieriger. Die Ursache liegt schlicht darin, dass der Übertragungskanal von jedem Funk-Slave zum Funk-Master unterschiedlich ist. Das heißt, der Funk-Master muss für jedes Datenpaket eines jeden Funkteilnehmers den Übertragungskanal neu schätzen, sodass die Nutzerdaten mittels Entzerrung und Dekodierung restauriert werden können. Zum Schätzen werden je nach Funksystem Präambeln, Trainingssequenzen oder Pilotsignale verwendet, um den dedizierten Übertragungskanal einer Funkverbindungen zwischen Sender und Empfänger bestimmen zu können.

Die komplexeren Verfahren MU-MIMO und OFDMA bieten die Möglichkeit, mehrere Funkteilnehmer im Uplink – für die Übertragung der Istwerte – gleichzeitig senden zu lassen. Für off-the-shelf Funkkomponenten aus der IEEE-802.x-Familie besteht diese Möglichkeit nicht. In Folge dessen muss beim Einsatz dieser Standardkomponenten pro Feldgerät ein Datenpaket mit Istwerten an die Steuerung übertragen werden. An Stelle von einem oder wenigen Datenpaketen mit Nutzdaten aller  $N$  Feldgeräte müssen  $N$  eigenständige Datenpakete, die gegebenenfalls dem Wettbewerb um den Zugriff auf das Medium unterworfen sind, übertragen werden.

#### 5.4.1.2.3. Bandbreite und Paketstruktur

Grundsätzlich bestimmt die Systembandbreite zusammen mit der Antennenzahl, dem Modulations- und Codierungsschema die Systemkapazität und damit die maximale Bruttoübertragungsrate eines Funksystems. Durch Priorisierung von Daten, beispielsweise nach AC, durch Auswertung von Güteparametern, beispielsweise von Link Quality Indicator (LQI) und von Channel Quality Indicator (CQI), implementieren Funksysteme nach dem Stand der Technik eine bedarfsgerechte Anpassung der Datenrate pro Nutzer im laufenden Betrieb. Für die Betrachtungen im Rahmen der Latenzmodellierung dieses Abschnitts sei angenommen, dass ein Funksystem die feste Übertragungsrate  $R_W$  für die Datenübertragung bereitstellt. In der Tat mag  $R_W$  pro Funkteilnehmer und insbesondere pro Übertragungsrichtung variieren. Für die Herleitung der Beziehungen zur Latenzmodellierung stellt die Annahme an dieser Stelle keine Einschränkung dar.

Abbildung 5.10 veranschaulicht das Modell einer Paketstruktur für die funkbasierte Datenübertragung. Im Kern besteht ein Datenpaket der Dauer  $T_{Pack}$  aus zwei Bestandteilen: einem Overhead der Dauer  $D_{Over}$  und den Nutzdaten der Dauer  $D_{BW}$ . Dabei umfasst der Overhead Präambel beziehungsweise Trainingssequenz, ACK-Paket und feste Zeitfenster wie beispielsweise  $D_{IFG}$  für die Umschaltdauer zwischen Daten- und ACK-Paket.

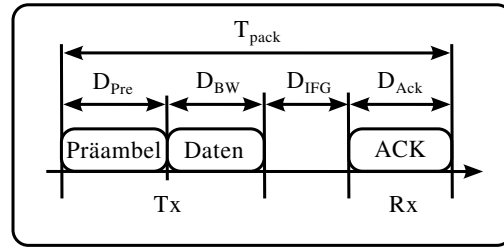


Abbildung 5.10.: Modell der Paketstruktur zur Datenübertragung.

Typischerweise bieten Funkkomponenten die Eigenschaft, übertragene Datenpakete auf der Sicherungsschicht durch ACK-Pakete zu bestätigen. Daraus resultiert die Verzögerung  $D_{Ack}$  eines Bestätigungspakets im Rückkanal. Ferner veranschaulicht Abbildung 5.10 auch die Umschaltdauer einer Funkkomponente im Halbduplex, die zwischen dem Senden und Empfangen der Komponente für den Transceiver benötigt werden. Im Gleichklang zur Analyse der drahtgebundenen Übertragung werden diese Umschalt Dauern durch den Parameter  $D_{IFG}$  modelliert. Schließlich ist all diesen Overhead-Parametern gemein, dass sie zum Zwecke der Latenzmodellierung direkt über Zeitdauern ausgedrückt werden können, da sie unabhängig von der Übertragungsrate  $R_W$  des Funksystems sind beziehungsweise gängige Funksysteme ihren Overhead mit einer festen, robusteren und vor allem abwärtskompatiblen Übertragungsrate versehen. Folglich ergibt sich für die Dauer des Overheads  $D_{Over}$  für die Übertragung eines Datenpakets

$$D_{Over} = D_{Pre} + D_{IFG} + D_{Ack}. \quad (5.8)$$

Die Übertragungsdauer des reinen Datenteils eines Datenpakets hängt nun von der Übertragungsrate  $R_W$  ab. Für die Übertragungsverzögerung  $D_{BW}$  gelten selbige Betrachtungen wie für die drahtgebundene Übertragung

$$D_{BW}(n, s_{App}) = \frac{S(n, s_{App})}{R_W}, \quad n \in [1, N]. \quad (5.9)$$

Die Paketgröße  $S(n, \cdot)$  kann die Nutzdaten von  $n$  Feldgeräten beinhalten. Im Falle eines Broadcasts der Sollwerte von der Steuerung zu allen Feldgeräten gilt  $n = N$ . Im Falle eines Unicasts der Istwerte von Feldgerät zur Steuerung gilt hingegen  $n = 1$ .

#### 5.4.1.2.4. Resultierende Übertragungslatenz

Für die Sollwert-Übertragung als Broadcast ergibt sich somit

$$D_{c,N} = D_{MAC} + D_{Over} + D_{BW}(N, s_{App}). \quad (5.10)$$

Hier ist zu beachten, dass Broadcast-Nachrichten als Unconfirmed Services realisiert und ihre Pakete typischerweise nicht bestätigt werden. Bei Übertragungsfehlern sind Paketwiederholungen somit nicht ohne weitere Maßnahmen möglich. Zum anderen wird vereinfachend angenommen, dass die Paketgröße  $S$  hinreichend groß ist, um Nutzdaten per Broadcast in einem Datenpaket zu erfassen.

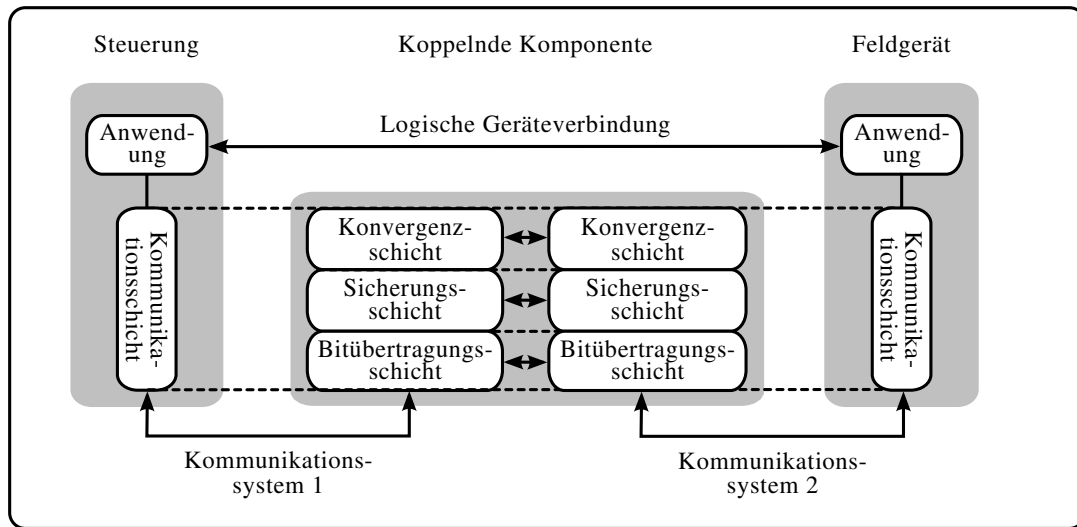


Abbildung 5.11.: Schichtenmodell der koppelnden Komponente.

Entsprechend gilt für die Istwert-Übertragung

$$\begin{aligned}
 D_{a,N} &= \sum_{n=1}^N (D_{MAC} + D_{Over} + D_{BW}(n, s_{App})) \\
 &= N \cdot (D_{Over} + D_{BW}(1, s_{App})) + \sum_{n=1}^N D_{MAC} .
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

Der Verzögerung  $D_{MAC}$  durch den Medienzugriff kommt entscheidende Bedeutung bei. Je nach Schema ist sie deterministisch wie beispielsweise für das Zugriffsverfahren TDMA oder aber sie stellt wie für das CSMA/CA-Verfahren nach IEEE 802.11 eine stochastische Zufallsgröße dar.

### 5.4.1.3. Koppelnde Komponente

Während es bei der Latenz über die eigentlichen Übertragungstrecken, sei es funkbasiert oder drahtgebunden, überwiegend um die Leistungsfähigkeit der Sicherungs- und Bitübertragungsschicht geht, spielt bei der koppelnden Komponente die Konvergenzschicht eine entscheidende Rolle.

#### 5.4.1.3.1. Latenz der Koppelkomponente

Abbildung 5.11 stellt schematisch dar, wie eine Koppelkomponente zwei Kommunikationssysteme – Kommunikationssystem 1 und Kommunikationssystem 2 – und deren Geräte – eine Steuerung in System 1 und ein Feldgerät in System 2 – miteinander verbindet. Auf Anwendungsschicht besteht weiterhin eine logische Geräteverbindung. Die Kopplung kann prinzipiell auf jeder der drei Kommunikationsschichten erfolgen, was in Abschnitt 6.3 im Kontext der Anbindungskonzepte systematisch beleuchtet wird.

Unabhängig von der konkreten Art der Kopplung fügt die Koppelkomponente der Datenübertragung von Kommunikationssystem 1 nach Kommunikationssystem 2 eine Verzögerung  $D_{Coup}^{s1 \rightarrow s2}$  hinzu. Diese setzt sich zum einen aus der Verarbeitungszeit der Bitübertragungsschicht,

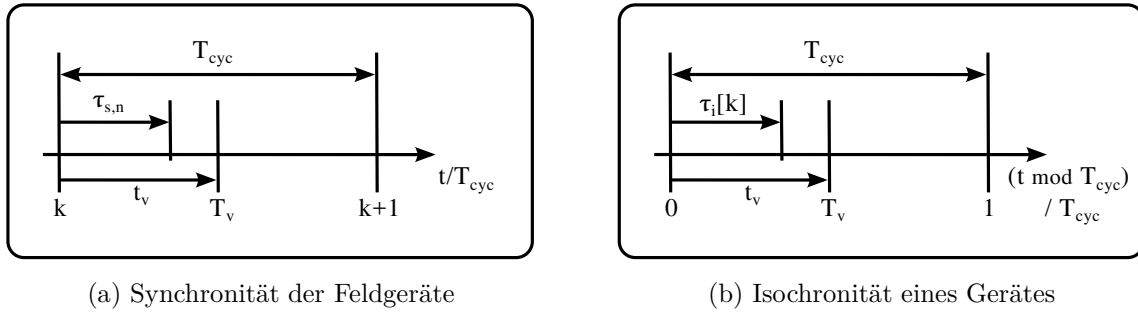


Abbildung 5.12.: Modell zur Synchronisation des Kommunikationssystems.

der Sicherungsschicht und der Umsetzung der jeweiligen Kommunikationsprotokolle in der Konvergenzschicht zusammen.

#### 5.4.1.3.2. Resultierende Übertragungslatenz

Die resultierende Übertragungslatenz für die Sollwert-Übertragung einer Koppelkomponente gemäß Abbildung 5.11 setzt sich demnach aus den drei Bestandteilen zusammen

$$D_{c,N} = D_{c,N}^{s1} + D_{Coup}^{s1 \rightarrow s2} + D_{c,N}^{s2}. \quad (5.12)$$

Entsprechend gilt für die Istwert-Übertragung

$$D_{a,N} = D_{a,N}^{s2} + D_{Coup}^{s2 \rightarrow s1} + D_{a,N}^{s1}, \quad (5.13)$$

wobei sich die Werte für  $D_{[c|a],N}^{s[1|2]}$  aus den Übertragungslatenzen der einzelnen Strecken für die drahtgebundene Übertragung gemäß Gleichung (5.2) und für die funkbasierte Übertragung gemäß der Gleichungen (5.10) und (5.11) ergeben.

### 5.4.2. Synchronisation des Systems

Im Kontext der zyklischen Kommunikation wurde bereits die Bedeutsamkeit einer einheitlichen Zeitbasis aller Geräte einer Anwendung betont. Insbesondere ist der Zeitpunkt von Interesse, zu dem Feldgeräte ihren physikalischen Prozess bedienen, sprich, dass die Feldgeräte ihre Aktoren mit den aktuellen Sollwerten zum Zeitpunkt der Gültigkeitszeit (Valid Time,  $T_v$ ) beschalten beziehungsweise von ihren Sensoren zum Zeitpunkt der Abtastzeit (Scan Time,  $T_s$ ) aktuelle Istwerte aufnehmen.

Mittels seines Synchronisationsverfahrens bietet das Kommunikationssystem für jeden Kommunikationspartner einen Service, der jedes Feldgerät befähigt, die  $T_v$  und  $T_s$  hinreichend gut zu approximieren. Das zugehörige Modell für die Synchronisation wird im folgenden beschrieben. Es berücksichtigt sowohl die *Synchronität* zwischen den Feldgeräten als auch die *Isochronität* eines Gerätes.

#### 5.4.2.1. Synchronität zwischen Geräten

Die Güte der Synchronität zwischen Feldgeräten wird mit dem Jitter  $\gamma_s$  gemessen, dessen Modell Abbildung 5.12a veranschaulicht. Dazu wird ein Kommunikationszyklus  $k = \lfloor t/T_{cyc} \rfloor$



der Dauer  $T_{cyc}$  auf der normierten Abszisse  $t/T_{cyc}$  betrachtet.

Durch die relative Lage innerhalb des Kommunikationszyklus wird  $T_v$  hinreichend beschrieben:  $T_v$  kann durch den Offset  $t_v$  bezüglich des Beginns des Kommunikationszyklus bestimmt werden. Jedes Feldgerät  $n \in [1, N]$  approximiert  $T_v$  mit dem Schätzwert  $\tau_{s,n}$  basierend auf seinem Synchronisationsverfahren. Der Jitter  $\gamma_{s,n}$  des Feldgeräts  $n$  beschreibt den Versatz dieses Schätzwerts von der tatsächlichen Valid Time

$$\gamma_{s,n} = \tau_{s,n} - t_v. \quad (5.14)$$

Beschreibt  $\vec{\gamma}_s$  einen Spaltenvektor der Dimension  $(N \times 1)$  mit den Jitterwerten  $\gamma_{s,n}$  aller  $n \in [1, N]$  Feldgeräte  $\vec{\gamma}_s = [\gamma_{s,1}, \gamma_{s,2}, \dots, \gamma_{s,N}]^T$ , so kann die maximale Differenz  $\Delta\gamma_s$  der Werte aller Feldgeräte zueinander wie folgt bestimmt werden

$$\Delta\gamma_s = \max(\vec{\gamma}_s) - \min(\vec{\gamma}_s). \quad (5.15)$$

#### 5.4.2.2. Isochronität eines Gerätes

Im Kontext der Synchronisation eines Kommunikationssystems drückt die Isochronität aus, mit welcher Güte ein Feldgerät die Valid Time  $T_v$  über mehrere Kommunikationszyklen hinweg approximieren kann. Ein Maß für die Güte dieser Approximation ist der Jitter  $\gamma_i$ , dessen Modell durch Abbildung 5.12b veranschaulicht wird. Dort stellt die Abszisse mit  $(t \pmod{T_{cyc}})/T_{cyc}$  eine normierte Form der Zeit dar – die mod-Operation bildet die kontinuierliche Zeit  $t$  auf den Wertebereich  $[0, T_{cyc})$  ab, der wiederum durch  $T_{cyc}$  auf den Wertebereich  $[0, 1)$  normiert wird. Der Parameter  $k \in \mathbb{N}^+$  beschreibt demnach den Index für fortlaufende Kommunikationszyklen.

Pro Kommunikationszyklus  $k$  schätzt ein Feldgerät die Valid Time  $T_v$  mit dem Schätzwert  $\tau_i[k]$  basierend auf seinem Synchronisationsverfahren. Der resultierende Jitter  $\gamma_i[k]$  beschreibt den Versatz des approximierten Schätzwerts von der tatsächlichen Valid Time

$$\gamma_i[k] = \tau_i[k] - t_v. \quad (5.16)$$

Aus praktischer Sicht ist von Bedeutung, wie sich  $\gamma_i[k]$  von Kommunikationszyklus zu Kommunikationszyklus verändert

$$\begin{aligned} \Delta\gamma_i[k] &= \gamma_i[k] - \gamma_i[k-1] \\ &= \tau_i[k] - \tau_i[k-1]. \end{aligned} \quad (5.17)$$

Abschließend sei angemerkt, dass die Betrachtungen zum Jitter  $\gamma_i$  im Sinne der Isochronität eines Gerätes für jedes einzelne Feldgerät  $n$  mit  $\gamma_{i,n} \in [1, N]$  einer Anwendung betrachtet werden müssen. In gleicher Weise sind die Betrachtungen zum Jitter  $\gamma_s$  im Sinne der Synchronität zwischen Feldgeräten für jeden Kommunikationszyklus  $k \in \mathbb{N}^+$  zu berücksichtigen.

#### 5.4.2.3. Synchronisationsklassen

Betrachtet man industrielle Anwendungen hinsichtlich ihrer Anforderungen an die Synchronisation, so kristallisieren sich für hybride Kommunikationssysteme und ihre Sub-Systeme drei Synchronisationsklassen heraus.

- Arbeiten die Feldgeräte verschiedener Sub-Systeme ohne Synchronisation zueinander, spricht man von nicht synchronisierten oder *asynchronen Sub-Systemen*. In der Automatisierungstechnik ist diese Synchronisationsklasse für Aufgaben zur Lage- oder Positionsregelung ausreichend, bei denen die Trajektorie eines bewegten Maschinenteils zwischen bestimmten Positionen unerheblich ist. Zudem erfolgt die Regelung zumeist nach dem Steuerungsprinzip, das mit einem offenen Regelkreis einhergeht.
- Werden die Feldgeräte verschiedener Sub-Systeme in der Genauigkeit eines Regelungstaktes zueinander betrieben, spricht man von schwach oder *grob synchronisierten Sub-Systemen*. Hier vereinfacht sich die Anforderung an die Gleichzeitigkeit, genauer gesagt an die Synchronität der Geräte (siehe Abschnitt 5.4.2.1) zueinander, denn es gilt  $\gamma_{s,n} < T_{cyc}$ . Typischerweise erfüllen in diesem Betriebsmodus die Feldgeräte innerhalb eines Sub-Systems die Anforderungen isochroner Echtzeit. In der Automatisierungstechnik ist diese Synchronisationsklasse anwendbar für Rundtaktmaschinen, bei denen die Feldgeräte eines Sub-Systems, beispielsweise auf einem beweglichen Maschinenteil, eine Motion-Anwendung ausführen, während Feldgeräte auf einem fest installierten Maschinenteil eines weiteren Sub-Systems dem beweglichen Maschinenteil zwischen den Regelungstakten mit Werkstücken versorgen.
- Arbeiten die Feldgeräte eines gesamten System, unabhängig von der Zugehörigkeit zu einem bestimmten Sub-System, im Sinne isochroner Echtzeit, so spricht man von *fein synchronisierten Sub-Systemen*. Mit dieser Synchronisationsklasse kann jede Art von Closed-Loop-Anwendungen – einschließlich von Motion-Control-Anwendungen – realisiert werden.

Unabhängig von der konkreten Synchronisationsklasse ist die Synchronisation eine Aufgabe des Gesamtsystems, die weder einer einzelnen Komponente noch einer einzelnen Schicht des Schichtenmodells zugeordnet werden kann. Die zugehörigen Verfahren zur Synchronisation werden als Querschnittsfunktionen in Abschnitt 7.2.2 adressiert.

### 5.4.3. Echtzeitfähigkeit

Der Begriff *Echtzeitfähigkeit* beinhaltet eine Reihe weiterer Kenngrößen, die miteinander verwebt sind. Mitunter existieren unterschiedliche Klassifizierungen des Begriffs, weswegen im folgenden die Bedeutung von Echtzeitfähigkeit im Kontext dieser Arbeit verdeutlicht wird.

#### 5.4.3.1. Eigenschaften von Echtzeit

Die Echtzeitfähigkeit eines Kommunikationssystems ist gebunden an die Eigenschaften der Rechtzeitigkeit und der Gleichzeitigkeit. Unter der *Rechtzeitigkeit* versteht man die Eigenschaft eines Kommunikationssystems, seine Datenübertragung einschließlich einhergehender Latenzen innerhalb definierter Zeitschranken zu erfüllen. Für die Sollwert-Übertragung wurde mit Gleichung (5.12) die zugehörige resultierende Übertragungslatenz  $D_{c,N}$  beschrieben. Diese Sollwerte sollen nun systemweit, also von jedem Feldgerät  $n \in [1, N]$ , zum Zeitpunkt  $T_v$  angewendet werden. Gemäß Abbildung 5.13a gilt für die Rechtzeitigkeit der Sollwert-Übertragung

$$t_v - D_{c,n} > \Delta_v \quad \forall n \in [1, N] \quad (5.18)$$

mit dem Offset  $t_v$  als Maß für  $T_v$  bezüglich des Beginns des Kommunikationszyklus, sowie der resultierenden Übertragungslatenz  $D_{c,n}$  der Sollwerte für Feldgerät  $n$ . Der Parameter

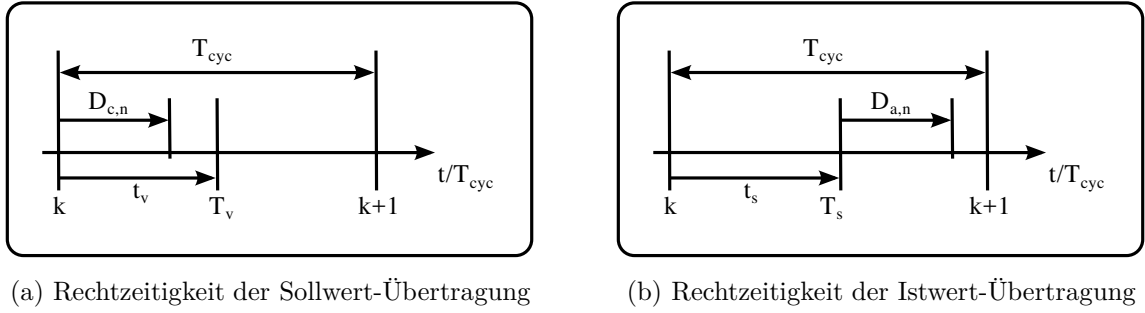


Abbildung 5.13.: Eigenschaft der Rechtzeitigkeit eines Kommunikationssystems.

$\Delta_v$  beschreibt schließlich eine Marge, die je nach Ausführung eines Feldgerätes für weitere Verarbeitungsschritte und entstehende Verzögerungen in der Anwendung selbst vorgesehen werden muss.

In ähnlicher Weise werden die Istwerte eines jeden Feldgerätes  $n \in [1, N]$  zum Zeitpunkt  $T_s$  gemessen und im aktuellen Kommunikationszyklus an die Steuerung übermittelt. Gemäß Abbildung 5.13b gilt für die Istwert-Übertragung mit der resultierenden Übertragungslatenz  $D_{a,n}$  der Istwerte eines Feldgerätes  $n$  und dem Offset  $t_s$  als Maß für  $T_s$  bezogen auf den Beginn des Kommunikationszyklus

$$(T_{cyc} - t_s) - D_{a,n} > \Delta_s \quad \forall n \in [1, N]. \quad (5.19)$$

Der Parameter  $\Delta_s$  beschreibt erneut eine Marge, die je nach Ausführung der Steuerung für weitere Verarbeitungsschritte, insbesondere für den eigentlichen Regelungsalgorithmus, vorgesehen ist.

Bei drahtgebunden legacy Systemen sind Soll- und Istwert-Übertragung eng verzahnt. Zu Beginn des Kommunikationszyklus werden alle Sollwerte innerhalb der Schranke gemäß Gleichung (5.18) übertragen. Die Feldgeräte wenden die Sollwerte zum Zeitpunkt  $T_v$  an. Danach tasten die Feldgeräte zum Zeitpunkt  $T_s$  Messwerte ab und übertragen diese als Istwerte an die Steuerung, wobei hier die Schranke gemäß Gleichung (5.19) zum Tragen kommt. Für die Reaktionszeit  $T_{re,n}$  eines Feldgerätes  $n$  gilt demzufolge

$$\begin{aligned} T_{re,n} &= t_s + D_{a,n} \\ &= \underbrace{t_v}_{> \Delta_v + D_{c,n}} + \Delta_{sv} + D_{a,n} \\ &< \Delta_v + \Delta_{sv} + D_{c,n} + D_{a,n} \end{aligned} \quad (5.20)$$

Neben der Rechtzeitigkeit stellt die *Gleichzeitigkeit* eine zweite Kerneigenschaft der Echtzeitfähigkeit dar [64]. Die mit der Gleichzeitigkeit einhergehenden Kenngrößen wurden im Kontext der Synchronität diskutiert. Fasst man die Synchronität  $\gamma_{s,n}$  aller Geräte  $\forall n \in [1, N]$  zueinander nach Gleichung (5.14), sowie die Isochronität  $\gamma_{i,n}[k]$  eines Gerätes  $n$  pro Kommunikationszyklus  $k$  nach Gleichung (5.16) zusammen, so ergibt sich für den Jitter  $\gamma_n[k]$  für Feldgerät  $n$  in

Kommunikationszyklus  $k$  das folgende Tupel

$$\gamma_n[k] = \{\gamma_{s,n}, \gamma_{i,n}[k]\} . \quad (5.21)$$

Um der Eigenschaft der Gleichzeitigkeit zu genügen, muss ein industrielles Kommunikationssystem für alle Feldgeräte und über alle Kommunikationszyklen hinweg die Schranke  $\Delta_\gamma$  für jegliche Form des Jitters einhalten

$$|\gamma_n[k]| < \Delta_\gamma \quad \forall n \in [1, N], k \in N^+ . \quad (5.22)$$

### 5.4.3.2. Kategorien von Echtzeit

Mit der Gleichzeitigkeit und Rechtzeitigkeit kann man Echtzeitfähigkeit in drei Kategorien einteilen [126]. Man unterscheidet zunächst zwischen ereignis- und zeitgesteuerten Systemen. So ist isochrone Echtzeit ausschließlich bei zeitgesteuerten Systemen relevant, während die Kriterien für weiche und harte Echtzeit sowohl im Kontext ereignis- wie zeitgesteuerter Systeme von Bedeutung sind [127].

Bei *weicher Echtzeit* spielt ausschließlich die Eigenschaft der Rechtzeitigkeit eine Rolle. Die Erfüllung des Kriteriums der Rechtzeitigkeit wird statistisch mit bestimmter Wahrscheinlichkeit erfüllt. Typischerweise bleibt die Funktionalität einer Anwendung bei Verletzen der Rechtzeitigkeit weiterhin gewahrt. Beispiele für Anwendungen mit weichen Echtzeitanforderungen finden sich in der Prozess- und Gebäudeautomatisierung oder auf höheren Ebenen der Automatisierungspyramide wie der Prozessleit- oder Fabrikebene.

Wie bei weicher Echtzeit kommt bei *harter Echtzeit* ausschließlich die Rechtzeitigkeit der Datenübertragung zum Tragen. Im Gegensatz zu Anwendungen mit weicher Echtzeit führt bei Anwendungen mit harten Echtzeitanforderungen das Nicht-Einhalten der geforderten Zeitschranken zur Fehlfunktion einer Anwendung, die potenziell zu Gefahr für Mensch und Maschine führen kann. Um diese Gefahren abzuwenden, kommen Mechanismen zur funktionalen Sicherheit zum Einsatz, die beispielsweise eine Notausfunktion auslösen. So kann zwar unmittelbare Gefahr abgewendet werden, der wirtschaftliche Schaden durch einen Produktionsstopp hingegen bleibt.

Neben der Rechtzeitigkeit im Sinne harter Echtzeit ist bei *isochroner Echtzeit* zusätzlich das Kriterium der Gleichzeitigkeit wirksam. Isochrone Echtzeit ist charakteristisch für viele Anwendungen der Feldebene der Fertigungsautomatisierung, zuvorderst bei Antriebsregelungen und Motion-Control-basierten Anwendungen.

### 5.4.4. Robustheit der Übertragung

Zur Beschreibung der Robustheit der Datenübertragung werden zwei unterschiedliche Modelle herangezogen. Zum einen wird in Abschnitt 5.4.4.1 ein Modell zur mittleren Paketverlustrate  $PLR$  betrachtet, das auf dem statistischen Mittelwert beruht. Zum anderen wird in Abschnitt 5.4.4.2 ein Modell für Bündelfehler diskutiert, womit funkbasierte Übertragungskanäle mit ihrer zeitlichen Verdichtung von Übertragungsfehlern – verursacht durch Fading und Interferenzen – nachgebildet werden können.

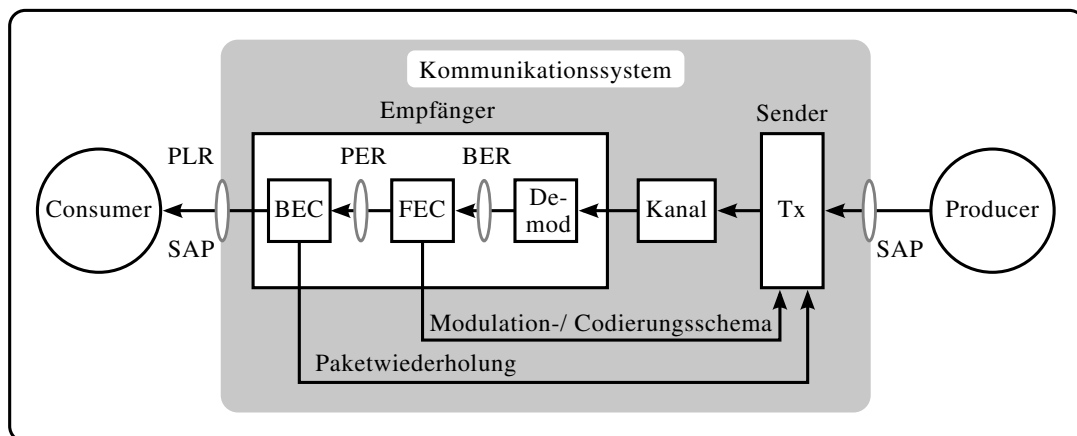


Abbildung 5.14.: Modell der Übertragungsstrecke zur Beschreibung von Übertragungsfehlern ( $BER$ ,  $PER$ ,  $PLR$ ) eines Kommunikationssystems.

#### 5.4.4.1. Mittlere Paketverlustrate

Abbildung 5.14 veranschaulicht schematisch die Übertragungsstrecke eines Producer-Consumer-Modells über ein Kommunikationssystem. Der Producer übergibt dem Kommunikationssystem an dessen SAP ein Datenpaket. Das Paket wird vom Sender über den Übertragungskanal übertragen, vom Empfänger entgegengenommen und über den SAP des Kommunikationssystems an den Consumer übergeben. Dabei beinhaltet der Empfänger Verarbeitungseinheiten zur De-Modulation, Vorwärts- und Rückwärtsfehlerkorrektur, die mit folgenden Kenngrößen zur Beschreibung von Übertragungsfehlern assoziiert werden:

- Bei der De-Modulation werden die vom Sender übertragenen und durch den Übertragungskanal verzerrten Symbole geschätzt. Dazu wird bei digitalen Modulationsverfahren typischerweise eine Kombination aus Entzerrer und Mapper eingesetzt. Die bei der De-Modulation detektierten Fehler werden als unkodierte Bitfehlerrate (raw Bit Error Rate,  $BER$ ) bezeichnet.
- Bei der Vorwärtsfehlerkorrektur (FEC) wird den zu übertragenden Daten sendeseitig Redundanz hinzugefügt, die bei der Dekodierung zur Korrektur von Übertragungsfehlern eingesetzt wird. Die En- und Dekodierung der FEC basiert typischerweise auf Datenblöcken. Entsprechend gibt die Paketfehlerrate (Packet Error Rate,  $PER$ ) ein Maß für die trotz FEC nicht korrigierbaren Datenblöcke an.
- Bei der Rückwärtsfehlerkorrektur (BEC) werden Datenpakete wiederholt, die nach Dekodierung mittels FEC als fehlerhaft erkannt werden. Datenpakete, die trotz mehrmaliger Übertragung nicht fehlerfrei vorliegen, gelten als verloren. Entsprechend gibt die Paketverlustrate (Packet Loss Rate,  $PLR$ ) ein Maß für die Anzahl der verlorenen Pakete bezüglich der Anzahl der übertragenen Pakete an

$$PLR = 1 - \frac{\text{Anzahl (angekommener) Pakete Consumer}}{\text{Anzahl (übertragener) Pakete Producer}}. \quad (5.23)$$

Funksysteme nach dem Stand der Technik stellen typischerweise Verfahren bereit, die die Fehlerkorrektur und die Modulation an die aktuellen Übertragungsverhältnisse mittels (CQI, LQI)

Tabelle 5.1.: Bündelfehler für Datenübertragung über IEEE-802.11n-Funkkanal: Kanalindex 6 (2,427 GHz-2,447 GHz), Aktualisierungszeit  $T_{up} = 4$  ms, Dauer 5 min, Büroumgebung.

<i>Record</i>	<i>PLR</i>	$B'_{min}$	$B_{max}$	$ W $	Beschreibung
(6a)	$1,8 \cdot 10^{-4}$	1	3	4	Interferenzfreier Kanal
(6b)	$1,6 \cdot 10^{-2}$	1 2	12 20	13 22	Interferenz auf Kanal

und Verkehrsklassen von Anwendungsdaten (AC) anpassen. Dazu werden die in Abbildung 5.14 angedeuteten Kontroll- und Feedbackschleifen verwendet. Darüber hinaus sei angemerkt, dass die BEC beim klassischen TCP/IP-Stack in der Transportschicht verortet ist. Zusätzlich kommt sie bei funkbasierten Kommunikationssystemen mittels MAC-Retransmissions bereits auf Medienzugriffsebene zum Einsatz.

#### 5.4.4.2. Bündelfehler

Die mittlere Verlustrate  $PLR$  ist ein gutes Maß für die Robustheit, wenn Übertragungsfehler gleichverteilt auftreten. Beim funkbasierten Übertragungskanal treten Übertragungsfehler jedoch in Form von Bündelfehlern auf. Diese werden durch Mehrwegeausbreitung und Dopplereffekt verursacht, der zu schnellen und langsamen Fading führt. Darüber hinaus sind Interferenzen durch andere Funkteilnehmer zu berücksichtigen, die ebenso gebündelt auftreten.

Um ein Modell für Bündelfehler aufzustellen, wird messtechnisch eine Menge aufeinanderfolgender Paketübertragungen betrachtet. Für diese Menge der Fenstergröße  $|W|$  werden nun die Anzahl der erfolgreich übertragenen Datenpakete  $B'$  und die der fehlerhaften Datenpakete  $B$  gezählt. Für einen gegebenen Datensatz von Paketübertragungen kann so je Fenstergröße  $|W|$  die minimale Anzahl  $B'_{min}$  erfolgreicher Datenpakete und die maximale Anzahl  $B_{max}$  fehlerhafter Datenpakete bestimmt werden, sodass folgende Beziehung gilt [128]

$$|W| = B'_{min} + B_{max}. \quad (5.24)$$

Darüber hinaus können Bündelfehler im Hinblick auf das Modell gemäß Abbildung 5.14 an verschiedenen Stellen der Übertragungsstrecke bestimmt werden.

- Bündelfehler können entweder, äquivalent zur  $PLR$ , am SAP der Kommunikationsschicht erfasst werden. Damit betrachtet man die Kommunikationsschicht als Black-Box und kann mit Auswertung der Charakteristika der Bündelfehler nach Gleichung (5.24) eine Aussage darüber treffen, ob eine Anwendung mit ihren Anforderungen über diese funkbasierte Übertragungsstrecke realisiert werden kann.
- Andererseits können Bündelfehler, äquivalent zur  $PER$ , zwischen den Verarbeitungsschritten von FEC und BEC bestimmt werden. Damit können die Parameter aus Gleichung (5.24) direkt in den Entwurf der BEC einfließen. Beispielsweise kann die Anzahl von Sendeversuchen beziehungsweise Paketwiederholungen eines Datenpakets mit der Fenstergröße  $|W|$  so gewählt werden, dass stets  $B'_{min} \geq 1$  gilt.

Tabelle 5.1 zeigt beispielhaft Parameter des Bündelfehlermodells für zwei Datensätze von Paketübertragungen über einen IEEE-802.11n-basierten Funkkanal. Dabei beinhaltet Datensatz *Record (6a)* Paketübertragungen für einen weitestgehend interferenzfreien Übertragungskanal. Das heißt, neben der betrachteten Übertragungsstrecke nutzen keine weiteren Funkteilnehmer den gleichen Funkkanal. Bei *Record (6b)* hingegen nutzen auch andere Funkteilnehmer den gleichen Funkkanal. Das WLAN-System ist so konfiguriert, dass die Sicherungsschicht maximal 3 Paketwiederholungen ausführt, bevor sie ein Paket verloren gibt. Für *Record (6a)* resultiert dies in einer Paketverlustrate  $PLR \approx 10^{-4}$ , für den durch Interferenz belasteten *Record (6b)* in  $PLR \approx 10^{-2}$ .

Im Hinblick auf das Bündelfehlermodell gehen bei *Record (6a)* eine Anzahl von bis zu  $B_{max} = 3$  aufeinanderfolgenden Paketen verloren. Entsprechend kann bei einer Fenstergröße von  $|W| = 4$  gemäß Gleichung (5.24) eine erfolgreiche Paketübertragung  $B'_{min} = 1$  garantiert werden. Für *Record (6b)* treten längere Bündelfehler auf. So kann im schlechtesten Fall für eine Fenstergröße  $|W| = 13$  und  $B'_{min} = 1$  ein Datenpaket nur einmal übertragen werden, für  $|W| = 22$  und  $B'_{min} = 2$  wäre eine Paketwiederholung möglich.

Das Beispiel aus Tabelle 5.1 zeigt, dass das Bündelfehlermodell eine genauere Charakterisierung einer Übertragungsstrecke erlaubt. Mit den so bestimmbareren Parametern kann eine bessere Aussage darüber getroffen werden, ob eine Anwendung unter diesen Bedingungen realisierbar ist.

## 5.5. Zusammenfassung und Bewertung

Gegenstand von Kapitel 5 war die Modellierung industrieller Kommunikationssysteme. Zunächst wurde das Schichtenmodell der Kommunikationsschicht industrieller Kommunikationssysteme definiert (siehe Abschnitt 5.2), das über seinen SAP der überliegenden Anwendungsschicht seine Dienste zur Verfügung stellt. Auf der Anwendungsschicht setzt so eine zentrale Steuerung logische Geräteverbindungen (siehe Abschnitt 5.2.2.1) zu ihren Feldgeräten auf, über die die Anwendungsschicht Nutzdaten ihrer Regelschleife (siehe Abschnitt 5.2.2.2) über die zyklische Kommunikation (siehe Abschnitt 5.3.2) austauscht.

Des weiteren formuliert die Anforderungsanalyse eine Reihe von Anforderungen an die zyklische Kommunikation. Für die zugehörigen Kenngrößen werden entsprechende Parametermodelle aufgestellt. Mit diesen Modellen der zeitlichen Kenngrößen – der Übertragungslatenz zum einen, der Synchronisation zum anderen – kann eine klare Definition des Begriffs der Echtzeitfähigkeit und ihrer Kategorien abgeleitet werden. Isochrone Echtzeit beschreibt demnach eine Kategorie, bei der sowohl die Eigenschaften der Rechtzeitigkeit, im Sinne der Übertragungslatenz, als auch die Eigenschaften der Gleichzeitigkeit, im Sinne der Synchronisation, von einem Kommunikationssystem bereitgestellt werden müssen. Motion-Control-basierte Anwendungen erfordern isochrone Echtzeit von ihrem unterliegenden Kommunikationssystem.

Basierend auf dem Schichtenmodell der industriellen Kommunikation wird im nächsten Kapitel 6 schrittweise die Systemarchitektur eines hybriden industriellen Kommunikationssystems entwickelt.

## 6. Systemarchitekturen für die Feldebene

Der Fokus dieses Kapitels liegt auf der Systemarchitektur des hybriden industriellen Kommunikationssystems. Abbildung 6.1 veranschaulicht schematisch einen Ausschnitt des hybriden Kommunikationssystems und differenziert dabei zwischen der funkbasierten Übertragung und der Anbindung funkbasierter Komponenten an ein drahtgebundenes Kommunikationssystem.

Abschnitt 6.2 widmet sich zunächst den Übertragungskonzepten für funkbasierte Kommunikationssysteme. Im Anschluss adressiert Abschnitt 6.3, wie ein Funksystem als Teilsystem an ein drahtgebundenes legacy Kommunikationssystem angebunden und in dieses integriert werden kann. Abschnitt 6.4 fasst die Ergebnisse des Kapitels zusammen. Die resultierende Systemarchitektur bildet dann die Grundlage für den anschließenden verfeinerten Systementwurf in Kapitel 7.

### 6.1. Vorbetrachtungen

Bevor die Systemarchitektur des hybriden industriellen Kommunikationssystems in Form ihrer funkbasierten Übertragungs- sowie ihrer Anbindungskonzepte an drahtgebundene Systeme diskutiert wird, beleuchten die folgenden Vorbetrachtungen allgemeine, die Systemarchitektur beeinflussende Aspekte.

#### 6.1.1. Paradigma I - Transparenz für Anwendungsschicht

Aus der Anforderungsanalyse und deren abschließender Bewertung geht hervor, dass Maschinenbauer und Errichter einer industriellen Anwendung implizit erwarten, dass die Nutzbarkeit vorhandener, ihnen bereits bekannter Kommunikationssysteme durch das Hinzufügen von funkbasierten Komponenten weiterhin gewährleistet bleibt. Des weiteren soll ein Mischbetrieb unterschiedlicher Kommunikationstechnologien aus Kundensicht nahtlos und unbemerkt erfolgen. Dieser von Anforderungsseite gesponnene Faden soll hier aufgenommen und mit

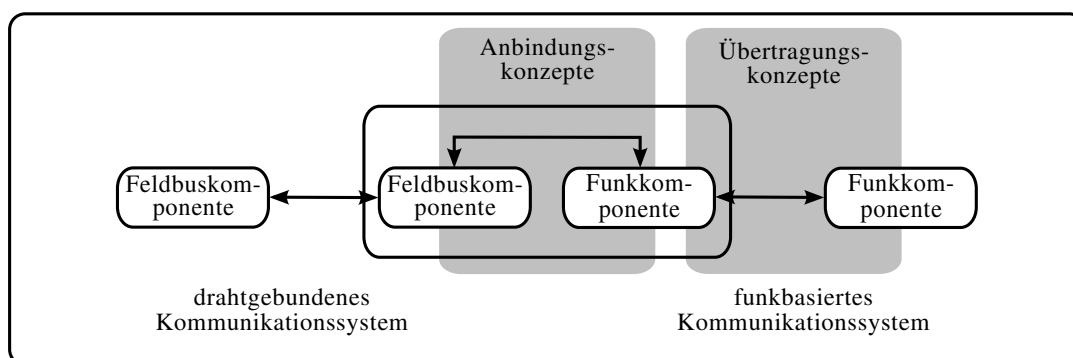


Abbildung 6.1.: Überblick zum Aufbau des Kapitels zur Systemarchitektur.



anderen, bereits diskutierten Punkten verbunden werden, um so eine nachhaltige, explizite Aussage zur Transparenz auf Anwendungsschicht zu formulieren.

Durch Verwendung eines Schichten-basierten Ansatzes zur Modellierung industrieller Kommunikationssysteme erfolgt bereits durch dieses Architekturmuster eine Trennung in Schichten gemäß ihrer jeweiligen Funktionalitäten. Auf diese Weise wird der Anwendungsschicht mit dem SAP eine abstrakte Schnittstelle der Kommunikationsschicht präsentiert, auf der eine Anwendung logische Geräteverbindungen aufbaut.

Weiterhin werden für die Latenzmodellierung eines hybriden Kommunikationssystems logische Geräteverbindungen zwischen Geräten in unterschiedlichen Sub-Systemen über eine Kopplungskomponente mit unterschiedlichen Kommunikationstechnologien hinweg in Abbildung 5.11 betrachtet. Auch dieses Modell trägt der Forderung nach Transparenz auf Anwendungsschicht Rechnung.

### 6.1.2. Paradigma II - Bewusster Einsatz von Funktechnik in ISM-Bändern

In Abschnitt 2.4.3 wurden Aspekte der Regulierung für funkbasierte Kommunikation in der Automatisierung diskutiert. Die wesentliche Erkenntnis daraus lautet, dass ein explizit zugeteiltes Frequenzspektrum für industrielle Anwendungen seit Ende 2019 im Rahmen von 5G-Campusnetzen zur privaten Nutzung prinzipiell möglich ist, die Vergabep Praxis und die damit einhergehenden Abhängigkeiten und versteckten Kosten viele Maschinenbauer – Stand Herbst 2020 – von einem Ein- beziehungsweise Umstieg abhalten. Folglich bleibt es für die Vielzahl von kleinen und mittelständischen Betreibern industrieller Netzwerke nach wie vor die bessere Wahl, auf die frei verfügbaren, lizenzfreien ISM-Bänder zurückzugreifen. Auf längere Sicht steht dort allerdings einer steigenden Nutzerzahl ein begrenztes Frequenzspektrum gegenüber. Eine Maßnahme der Regulierungsbehörden für das gängige ISM-Band bei 2,4 GHz besteht beispielsweise darin, Fairness-Kriterien für die Medienzugriffsverfahren der dort eingesetzten Funkssysteme normativ festzuschreiben, um so jeder Technologie ein Mindestmaß an Verfügbarkeit zu garantieren, was im Widerspruch zu den Anforderungen industrieller Anwendungen steht.

Eine Reaktion der Branchenverbände – wie der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) und dem ZVEI – war und ist zum einen, sich verstärkt in Gremien und Arbeitsgruppen gegenüber den Regulierungsbehörden – wie der WiRIA oder der 5G-ACIA – zu engagieren und zu positionieren (siehe Abschnitt 2.4.3). Zum anderen lassen Positionspapiere von VDI und GMA verlauten, Funktechnik in den ISM-Bändern im industriellen Kontext nur bewusst und überwiegend dort einzusetzen, wo drahtgebundene Systeme keine praktikablen und wirtschaftlichen Lösungen bieten können [55]. Eine Konsequenz daraus lautet, dass die Anzahl der funkbasierten Verbindungen innerhalb eines hybriden Kommunikationssystems möglichst gering gehalten werden sollte.

Ferner wird für den Fall, dass Funktechnik eingesetzt wird, eine Funknetzplanung empfohlen. Diese beinhaltet, dass die Umgebung einer industriellen Anwendung funktechnisch erfasst und analysiert wird, um den optimalen Einsatz von industriellen Funkkomponenten, deren räumliche Platzierung sowie die Nutzung bestimmter Frequenzbänder planen zu können.

Tabelle 6.1.: Ausführungsformen von Einzelpunktverbindungen.

Steuerungsseite	Feldgeräteseite	Relevanz	Beschreibung
Einzelgerät	Einzelgerät	-	funkbasiertes Einzelgerät
Einzelgerät	Koppelkomponente	○	abgesetzte Gerätegruppe
Koppelkomponente	Einzelgerät	○	abgesetztes Einzelgerät
Koppelkomponente	Koppelkomponente	●	Funkbrücke für Gerätegruppen

6.2. Übertragungskonzepte für funkbasierte Verfahren

Gegenstand dieses Abschnitts sind funkbasierte Übertragungskonzepte für industrielle hybride Kommunikationssysteme. Hierfür werden in Abschnitt 6.2.1 zunächst die physikalischen Verbindungen der Übertragungskonzepte betrachtet. Abschnitt 6.2.2 adressiert schließlich Konzepte, wie die Übertragung von Datenpaketen über diese physikalischen Verbindungen organisiert werden kann. Für die in diesem Abschnitt verwendeten Begriffe sei auf Anhang B und die dortigen Erläuterungen zu Multiplex, Duplex und synchronen Netzen verwiesen.

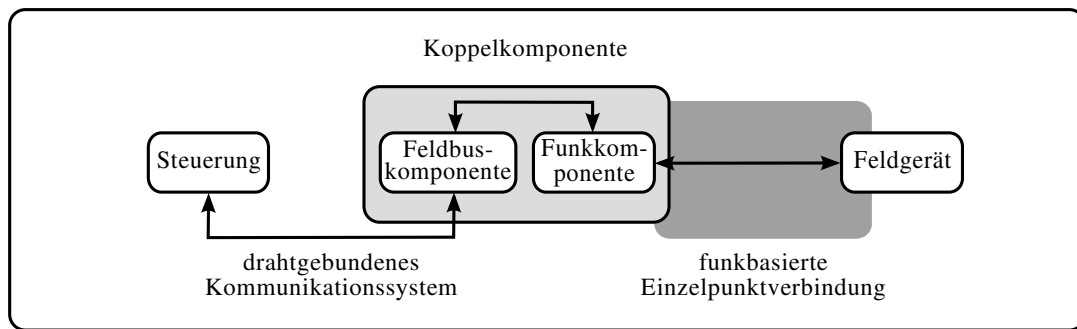
6.2.1. Physikalische Verbindungskonzepte - Topologien für Funksysteme

In Abschnitt 5.3.1 wurden klassische Topologien der Feldebene der Automatisierung diskutiert. In diesem Abschnitt werden diese Betrachtungen auf hybride Kommunikationssysteme einschließlich der funkbasierten Übertragungsstrecken erweitert. Auch für Funktopologien gilt, dass sich der Begriff der Topologie rein auf die Bitübertragungsschicht des ISO/OSI-Referenzmodells bezieht.

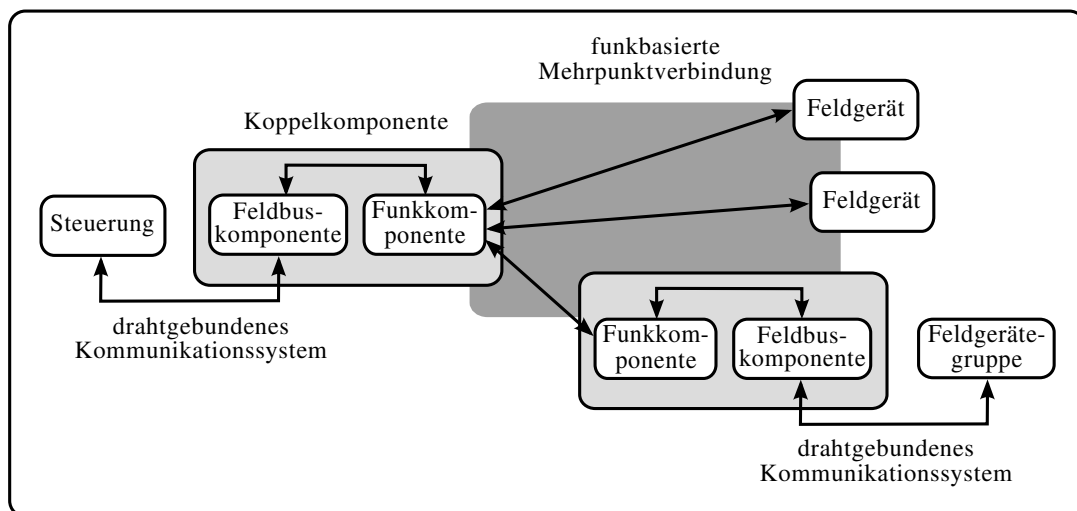
6.2.1.1. Einzelpunktverbindungen

Die einfachste Form einer funkbasierten Verbindung ist die physikalische Einzelpunktverbindung (P2P), bei der zwei Funkteilnehmer direkt miteinander verbunden sind. Abbildung 6.2a stellt eine Einzelpunktverbindung für ein industrielles Kommunikationssystem dar. Für die Charakteristik der Funktopologie ist es unerheblich, in wie weit eine Funkkomponente in ein Gesamtsystem integriert ist, sei es in ein einzelnes Feldgerät oder in eine koppelnde Komponente. Maßgeblich ist die Art der physikalischen Verbindung der Funkkomponenten zueinander.

Basierend auf diesen simplen Einzelpunktverbindungen lassen sich Anwendungen auf unterschiedliche Art und Weise aufbauen. In der in Abbildung 6.2a veranschaulichten Ausführungsform wird die funkbasierte Einzelpunktverbindung steuerungsseitig durch eine Koppelkomponente, feldgeräteseitig durch ein Einzelgerät realisiert. Damit lässt sich beispielsweise ein bestehendes drahtgebundenes Kommunikationssystem um die Anbindung eines Einzelgerätes erweitern. Tabelle 6.1 fasst potenzielle Systemkonfigurationen für den Einsatz von funkbasierten Einzelpunktverbindungen zusammen. Die mächtigste dieser Konfigurationen stellt eine Funkbrücke dar, mit der sich zwei drahtgebundene industrielle Kommunikationssysteme koppeln lassen.



(a) Beispielausführung einer funkbasierten Einzelpunktverbindung.



(b) Beispielausführung einer funkbasierten Mehrpunktverbindung.

Abbildung 6.2.: Funktopologien für hybride industrielle Kommunikationssysteme.

### 6.2.1.2. Mehrpunktverbindungen

Im Gegensatz zur Einzelpunktverbindung baut bei der Mehrpunktverbindung (P2MP) eine Funkkomponente physikalische Verbindungen zu einer Vielzahl anderer Funkkomponenten auf. Kennzeichnend hierfür ist, dass nur eine dedizierte Funkkomponente (Funk-Master, Funk-Controller) mehrere Verbindungen unterhält, während die anderen Funkkomponenten (Funk-Slaves, Funk-Clients) nur eine Verbindung zur dedizierten Master-Komponente aufweisen. Mit dieser Definition werden Mehrpunktverbindungen explizit von vermaschten Funktopologien abgegrenzt, bei denen alle Funkkomponenten eine oder mehrere physikalische Verbindungen miteinander aufbauen.

Abbildung 6.2b stellt eine Ausführungsform der funkbasierten Mehrpunktverbindung im Kontext eines industriellen hybriden Kommunikationssystems dar. Die Steuerung ist über ein drahtgebundenes Kommunikationssystem an eine Koppelkomponente angebunden. Diese spannt ein Funknetzwerk aus Mehrpunktverbindungen auf und koppelt so zum einen zwei einzelne Feldgeräte an. Zum anderen wird durch eine weitere Koppelkomponente eine Funkbrücke zur Anbindung einer Feldgerätegruppe realisiert. Die in Tabelle 6.1 aufgeführten Systemkonfi-

gurationen für Einzelpunktverbindungen gelten in gleicher Weise für Mehrpunktverbindungen, wobei zusätzlich ein Mischbetrieb der einzelnen Konfiguration gemäß Abbildung 6.2b möglich ist.

Im Ergebnis eröffnet sich damit für eine industrielle Anwendung aus Steuerung und  $N$  Feldgeräten eine Reihe von Realisierungsmöglichkeiten, ein hybrides Kommunikationssystem auszulegen. Zum einen kann eine steuerungsseitige Koppelkomponente der dedizierte Funk-Master eine  $N$ -Punktverbindung zu  $N$  funkbasierten Feldgeräten sein. Zum anderen kann eine Einzelpunktverbindung als Funkbrücke eingesetzt werden, bei der die Steuerung  $N_p$  Feldgeräte direkt über das drahtgebundenen Kommunikationssystem anbindet und die verbleibenden  $N_s = N - N_p$  Feldgeräte über die Funkbrücke.

## 6.2.2. Vermittlungskonzepte für Datenpakete

Nach Analyse der Charakteristika physikalischer Funkverbindungen auf Bitübertragungsschicht werden in diesem Abschnitt die Vermittlungskonzepte für Datenpakete zwischen Funkteilnehmern betrachtet, die der überliegenden Sicherungsschicht des industriellen Kommunikationssystems zugeordnet werden. Zum Zweck einer klaren Definition des Begriffs *Datenpaket* im Kontext dieser Arbeit sei auf Anhang C verwiesen.

### 6.2.2.1. Explizite Paketuweisung

Zunächst können Datenpakete in unterschiedlicher Weise über die in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen physikalischen Verbindungen der Bitübertragungsschicht übermittelt werden. Das erste Konzept beruht darauf, Datenpaket explizit vom Sender über die Funkverbindung zum Empfänger zuzustellen. Damit ist gemeint, dass der Sender dem Datenpaket die Zieladresse des angedachten Empfängers hinzufügt. Der Inhalt des Datenpakets ist somit ausschließlich für den Empfänger reserviert. Für das Prinzip der expliziten Paketuweisung wird synonym der Begriff *Unicast* verwendet. Beispielsweise wird im Bereich des Mobilfunks diese Art der Paketuweisung typischerweise durch dedizierte – im Gegensatz zu geteilten Kontrollkanälen – physikalische Kanäle realisiert.

Im Kontext dieser Arbeit sind die Betrachtungen zur Datenvermittlung für Einzelpunktverbindungen trivial, da keine Freiheitsgrade existieren: Bei allen Einzelpunktverbindungen kommt daher de-facto die explizite Paketuweisung zum Einsatz.

Bei Mehrpunktverbindungen ist hingegen zwischen den Übertragungsstrecken zu differenzieren: Für das Vermitteln eines Datenpakets von den Funk-Slaves zum Funk-Master – dem Uplink – ist wiederum explizite Paketuweisung das Mittel der Wahl, sofern eine Funktechnologie off-the-shelf Komponenten im ISM-Band – und keine Mechanismen wie Uplink MU-MIMO oder OFDMA – nutzt. Für die beiden benannten Verfahren ist eine klare Zuordnung hinsichtlich einer expliziten Paketuweisung nur teilweise möglich. Im Fall von MU-MIMO kann man einerseits argumentieren, dass beispielsweise ein jeder Funk-Slave sein eigenes Datenpaket formt und explizit vermittelt. Es obliegt dann der Leistungsfähigkeit des Empfängers im Funk-Master, das Datenpaket eines konkreten Funk-Slaves aus dem konstruktiv überlagerten Empfangssignal aller Funk-Slaves zu detektieren – die Paketuweisung erfolgt eher explizit. Im Fall von OFDMA kann man andererseits argumentieren, dass allen Funk-Slaves durch Signalisierung bekannt ist,

auf welche Positionen im Zeit-Frequenz-Raster ihre Datenpakete abzubilden sind. Dem Empfänger im Funk-Master obliegt es dann, die implizit verteilten Datenpakete der Funk-Slaves dem Gesamtsignal zu entnehmen – die Paketverteilung erfolgt eher implizit.

#### 6.2.2.2. Implizite Paketverteilung

Typischerweise kommt implizite Paketverteilung bei Streaming-Diensten, im Rundfunk oder bei Netzwerkmanagementaufgaben zum Einsatz, wenn beispielsweise alle Netzknoten mit der gleichen Information versorgt werden müssen. Für bidirektionale Datenverbindungen, über die individuelle Nutzerdaten einer Anwendung transportiert werden, ist der Einsatz impliziter Paketverteilung eher untypisch. Mit impliziter Paketverteilung kann eine signifikante Reduzierung der Last auf der Übertragungsstrecke erreicht werden als Folge dessen, dass mit einem einzigen Datenpaket des Senders mehrere Empfänger versorgt werden. Bei expliziter Paketzuteilung wären hierfür entsprechend mehrere Datenpakete von Nöten. Als wesentlicher Nachteil der impliziten Paketverteilung ist der fehlende Rückkanal anzuführen, wodurch Fehlerkorrekturmechanismen nicht über unmittelbare Feedback-Schleifen eingeleitet werden können beziehungsweise zusätzlicher Aufwand in die Fehlerkorrektur spendiert werden muss.

Betrachtet man im Kontext dieser Arbeit die Übertragungsstrecke vom Funk-Master zu den  $N$  Funk-Slaves – den Downlink – einer Mehrpunktverbindung, so kann der Funk-Master weiterhin Datenpakete zum einen per expliziter Paketzuteilung an jeden einzelnen Funk-Slave übertragen. Zum anderen kann der Funk-Master ein einziges Datenpaket übermitteln, das zeitgleich an alle Funk-Slaves – oder eine Gruppe von Funk-Slaves – gerichtet ist. Dieses Konzept wird als implizite Paketverteilung bezeichnet und in Kombination mit einem *Broadcast* – oder *Multicast* – vom Funk-Master zu den Funk-Slaves realisiert.

Als besonders effizient erweist sich das Konzept der impliziten Paketverteilung, wenn – wie in Abbildung 6.2b veranschaulicht – über eine funkbasierte Verbindung nicht nur ein einzelnes Feldgerät, sondern über eine Koppelkomponente eine ganze Feldgerätegruppe angebunden wird. Das Zusammenspiel von impliziter Paketverteilung für die funkbasierte Übertragung einerseits und Summenrahmenprotokoll für Industrial Ethernet andererseits wird vertiefend in Abschnitt 7.1 im Rahmen des Systementwurfs der Koppelkomponente für die Industrial-Ethernet-Brücke diskutiert.

### 6.3. Anbindungskonzepte für funkbasierte Verfahren

Der vorherige Abschnitt 6.2 fokussierte auf funkbasierte Übertragungskonzepte für industrielle Kommunikationssysteme. Aufbauend auf dem Schichtenmodell wurden sowohl grundlegende Betriebsarten, Verbindungskonzepte auf Bitübertragungsschicht als auch Vermittlungskonzepte für Datenpakete auf Sicherungsschicht betrachtet. In diesem Abschnitt werden die für die Integration funkbasierter Systemkomponenten in ein drahtgebundenes System benötigten Anbindungskonzepte untersucht. Dazu werden systematisch die Schichten des industriellen Kommunikationssystems betrachtet.

#### 6.3.1. Kopplung auf Bitübertragungsschicht

Zunächst werden Anbindungskonzepte auf Ebene der Bitübertragungsschicht diskutiert. In diese Kategorie fallen beispielsweise Repeater und Hubs. Diese Komponenten und deren Anbin-

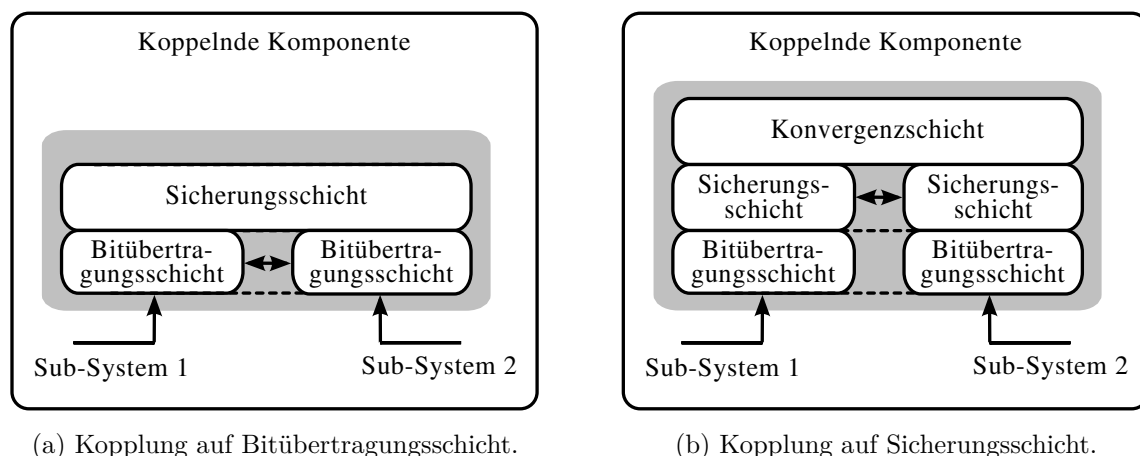


Abbildung 6.3.: Anbindungskonzepte für industrielle Kommunikationssysteme.

dungskonzepte sind für die Kopplung funkbasierter und drahtgebundener Systeme ungeeignet, da die unterschiedlichen physikalischen Charakteristika der Übertragungsmedien weitreichende Auswirkungen bis in die Sicherungsschicht aufweisen, insbesondere auf den Medienzugriff. Mit Funkübertragung kann beispielsweise keine physikalische Ringtopologie realisiert werden, die bei drahtgebundenen Kommunikationssystemen durch Kabelverbindungen von Gerät zu Gerät noch möglich ist.

In gleicher Weise sind Medienzugriffsverfahren wie Token-Passing oder das Summenrahmenprotokoll, die auf physikalischen Ring- oder Linientopologien aufbauen, per Funk nicht realisierbar beziehungsweise nur mittelbar durch Protokolle auf höheren Schichten abbildbar [89]. Wie in Abbildung 6.3a dargestellt würde ein Koppeln auf Bitübertragungsschicht hingegen eine transparente Sicherungsschicht für beide Sub-Systeme – für ein drahtgebundenes und ein funkbasiertes Sub-System – erfordern, was auf Grund der beschriebenen Eigenschaften von Funksystemen nicht umsetzbar ist.

### 6.3.2. Kopplung auf Sicherungsschicht

Im Kontext der Netzwerktechnik sind Bridges und Switches die klassischen Vertreter für Koppellemente auf Ebene der Sicherungsschicht. Abbildung 6.3b stellt schematisch die Kopplung von industriellen Kommunikationssystemen auf der Sicherungsschicht dar. Die Koppelkomponente führt die Kommunikationsschicht zweier Sub-Systeme – eines Sub-Systems 1 und eines Sub-Systems 2 – aus. Dabei weist jedes Sub-System seine eigenständige Ausführung von Bitübertragungs- und Sicherungsschicht auf. Die eigentliche Kopplung der Sub-Systeme erfolgt zwischen den Ausführungen der Sicherungsschicht.

Zur Umsetzung der Kopplung ist eine Konvertierung der Protokolle der Sicherungsschichten samt ihrer Datenstrukturen von Nöten. Diese Aufgabe übernimmt entweder

1. die Konvergenzschicht des industriellen Kommunikationssystems, die regulär im Sinne des Schichtenmodells auf die jeweiligen Sicherungsschichten und deren Services zugreift, oder

2. eine dedizierte Kopplungsfunktionalität, die unmittelbar zwischen den Sicherungsschichten, gegebenenfalls mit direkten Zugriff auf Funktionalitäten und Attribute der jeweiligen Sicherungsschichten, operiert.

Der Vorteil von Ansatz 1.) besteht in seiner Modularität, die eine einfache Erweiterbarkeit für verschiedene industrielle Kommunikationssysteme bietet. Als Nachteile sind die höheren Aufwände zu nennen, um die modulare Struktur initial zu erstellen. Des weiteren kann dieser Ansatz in puncto Leistungsfähigkeit, insbesondere im Hinblick auf Latenz und Speicherbedarf mit dem optimierteren Lösungsansatz 2.) nicht mithalten. Dem gegenüber steht, dass das Konzept für Ansatz 2.) auf die jeweiligen Sub-Systeme zugeschnitten und nicht ohne weiteres – beziehungsweise nur mit hohem Aufwand – auf andere industrielle Kommunikationssysteme übertragbar ist.

In Summe hängt die Auswahl des Anbindungskonzepts schließlich von zahlreichen Parametern ab, von denen hier mit den Arten der zu koppelnden Kommunikationssysteme, deren Bekanntheit und Verbreitung, sowie den Hardware- und Softwarebausteinen, gegebenenfalls Betriebssystemen der Koppelkomponenten die Wichtigsten benannt sind. Im Allgemeinen ist diesbezüglich in der Automatisierungstechnik der Trend zu verzeichnen, im Sinne der Wiederverwendbarkeit und Wartbarkeit verstärkt auf Modularisierung von Bausteinen und den Einsatz von Plattform-Konzepten zu achten [1].

### 6.3.3. Asymmetrische Kopplung

Die in den vorherigen Abschnitten 6.3.1 und 6.3.2 beschriebenen Anbindungskonzepte stellen eine idealtypische Klassifizierung dar. Die finale Kopplungslösung zweier konkreter Kommunikationssysteme hängt in der Praxis wesentlich von den Eigenschaften der jeweiligen Kommunikationssysteme ab und ist häufig nicht uneindeutig einer idealtypischen Klassifizierung zuzuordnen.

Führen zwei Kommunikationssysteme unterschiedliche Schichten des Protokollstapels aus, so erfolgt die Kopplung der Sub-Systeme quasi asymmetrisch. Koppelt man beispielsweise Industrial-Ethernet-basierte Systeme, die nur die Bitübertragungs- und die Sicherungsschicht ausführen, mit TCP/IP-basierten Funksystemen, die demnach auch Netzwerk- und Transportschicht ausführen, dann koppelt die Konvergenzschicht des industriellen Kommunikationsmodells die Sicherungsschicht des einen Systems mit der Transportschicht des anderen Systems. Mittels der Fallstudien in Teil III dieser Arbeit wird die asymmetrische Kopplung zweier Kommunikationssysteme am praktischen Beispiel verdeutlicht.

## 6.4. Zusammenfassung und Bewertung

Nach den systematischen Betrachtungen zu hybriden industriellen Kommunikationssystemen in diesem Kapitel 6 erfolgt nun eine abschließende Bewertung der Systemarchitektur. Darüber hinaus wird im Hinblick auf die weitere Umsetzung eines hybriden industriellen Kommunikationssystems die Auswahl für eine geeignete Systemarchitektur getroffen.

### **6.4.1. Architekturtreiber vs. Performance der Komponenten**

Im Zwischenfazit zu Teil I dieser Arbeit wurden ausgehend von der Anforderungsanalyse die wesentlichen Architekturtreiber für ein industrielles funkbasiertes Kommunikationssystem bestimmt. Dieser Faden wurde zu Beginn dieses Kapitels in den Vorbetrachtungen von Abschnitt 6.1 aufgenommen, um so in die Systematisierung der Architekturkonzepte – veranschaulicht durch Abbildung 6.1 – einzufließen.

Neben den aus den impliziten Anforderungen resultierenden Architekturtreibern beeinflussen weiterhin die Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit der drahtgebundenen wie funkbasierten Kommunikationssysteme die Systemarchitektur eines hybriden Kommunikationssystems. Zusammen bilden Architekturtreiber und die Leistungsfähigkeit der zu verknüpfenden Kommunikationssysteme ein Spannungsfeld für die Architekturentscheidung, das mitunter zu rekursiven Abhängigkeiten führt. Dies gilt insbesondere für die Anzahl der Netzknoten eines hybriden Kommunikationssystems und mündet konkret in der Frage, wie viele dieser Netzknoten durch funkbasierte Verbindungen angebunden werden müssen und können.

Der Lösungsansatz im Rahmen dieser Arbeit beruht darauf, die Anzahl der per Funk anzubindenden Netzknoten als abhängige Größe zu betrachten, die durch die Wahl der eingesetzten Funktechnologie bestimmt ist. Damit ist auch die maximale Anzahl der funkbasierten Komponenten vorrangig abhängig von der Funktechnologie. Die Systemarchitektur trägt dem Rechnung, indem sie Funkkomponenten modularisiert integriert und derart kapselt, sodass außerhalb der Funkkomponente eine flexible Anzahl funkbasierter Komponenten unterstützt werden kann. Damit ist ein Framework für ein hybrides industrielles Kommunikationssystem verfügbar, das die Kundenanforderung nach einer nahtlosen Integration funkbasierter Komponenten erfüllt. Die Machbarkeit der Anforderungen einer konkreten industriellen Anwendung – samt der dafür benötigten Funkverbindungen – können so in Abhängigkeit von der Wahl der Funktechnologie und deren Leistungsfähigkeit getroffen werden.

### **6.4.2. Systemarchitektur für hybrides Kommunikationssystem**

Zur Systemarchitektur tragen zwei wesentliche Aspekte bei: Zum einen erfordert der Betrieb eines hybriden Kommunikationssystems eine neue Systemkomponente. Diese sogenannte Koppelkomponente verbindet die unterschiedlichen Kommunikationssysteme beziehungsweise Sub-Systeme miteinander. Zum anderen legt die Systemarchitektur dar, wie die einzelnen Systemkomponenten – seien es physikalische Komponenten wie legacy Geräte und Koppelkomponenten oder Technologien wie das Anbindungs- und das Übertragungskonzept – im Gesamtsystem eingesetzt werden und miteinander interagieren.

#### **6.4.2.1. Bewertung der Koppelkomponente**

Abbildung 6.4 stellt schematisch den Aufbau der Koppelkomponente dar. Auf Seite des drahtgebundenen Sub-Systems realisiert ein Teil des Kommunikationsstacks die Anbindung an Industrial Ethernet. Gemäß der technischen Bestandsaufnahme – in erster Linie hinsichtlich der Klassifizierung von Industrial-Ethernet-Systemen – sind bei den hier betrachteten Industrial-Ethernet-Systemen vom Typ 3 alle Schichten oberhalb der Sicherungsschicht unbesetzt. Daher setzt die Konvergenzschicht nach der Definition des industriellen Kommunikationssystems unmittelbar auf Sicherungsschicht des Industrial-Ethernet-Stacks auf.



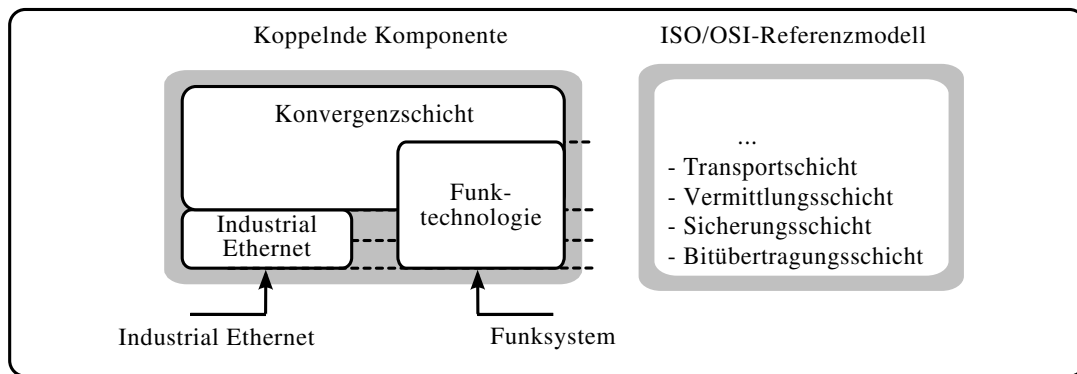


Abbildung 6.4.: Architektur der Koppelkomponente für hybrides Kommunikationssystem.

Seitens des funkbasierten Sub-Systems weist die Architektur der Koppelkomponente keine Einschränkung für gängige Funkstandards auf, was auch die Integration von Funktechnologien ermöglicht, die höhere Schichten des ISO/OSI-Referenzmodells besetzen. Die resultierende Struktur der Koppelkomponente stellt somit ein Anbindungskonzept nach dem Prinzip der asymmetrischen Kopplung dar (siehe Abschnitt 6.3.3).

Ferner ist die Koppelkomponente nach Abbildung 6.4 dahingehend auslegbar, dass sie entweder als Funk-Master oder als Funk-Slave betrieben werden kann. Entsprechend fungiert die Industrial-Ethernet-Komponente entweder als Industrial-Ethernet-Slave oder -Master.

#### 6.4.2.2. Bewertung aus Systemsicht

Die Koppelkomponente bildet den zentralen Baustein eines hybriden industriellen Kommunikationssystems, indem sie durch die Ausführung ihrer Konvergenzschicht wesentlich das Anbindungskonzept, als auch durch ihre Funktechnologie wesentlich das Übertragungskonzept bestimmt. Durch Integration der Koppelkomponente in ein Gesamtsystem wird das ganzheitliche hybride Kommunikationssystem aufgespannt, dessen Systemarchitektur mit Abbildung 6.5 veranschaulicht wird.

Zunächst sieht die Systemarchitektur nach Abbildung 6.5 das funkbasierte Übertragungskonzept von physikalischen Mehrpunktverbindungen vor. Dazu realisiert die steuerungsseitig angebundene Koppelkomponente den Funk-Master (FM) des Funksystems, während die anderen Koppelkomponenten die entsprechenden Funk-Slaves (FSs) beinhalten und ihrerseits weitere Feldgeräte und Feldgerätegruppen über das Industrial-Ethernet-basierte Kommunikationssystem anbinden. Auf diese Weise fungieren die Koppelkomponenten als Funkbrücke, vielmehr gar als *Industrial-Ethernet-Brücke*, zwischen den durch ihre drahtgebundene Schnittstelle angebotenen Feldgerätegruppen und der zentralen Steuerung.

Die durch eine Koppelkomponente angebundene Gerätegruppe formt aus Sicht des Gesamtsystems ein drahtgebundenes Sub-System. Die Steuerung baut nach wie vor logische Geräteverbindungen zu allen Feldgeräten auf, unabhängig der Zugehörigkeit zu einem bestimmten Sub-System. Unterstützt die Systemarchitektur  $N'$  Sub-Systeme, heißt das im Umkehrschluss, ein Funksystem muss  $N' - 1$  Funkverbindungen bereitstellen und gemäß den

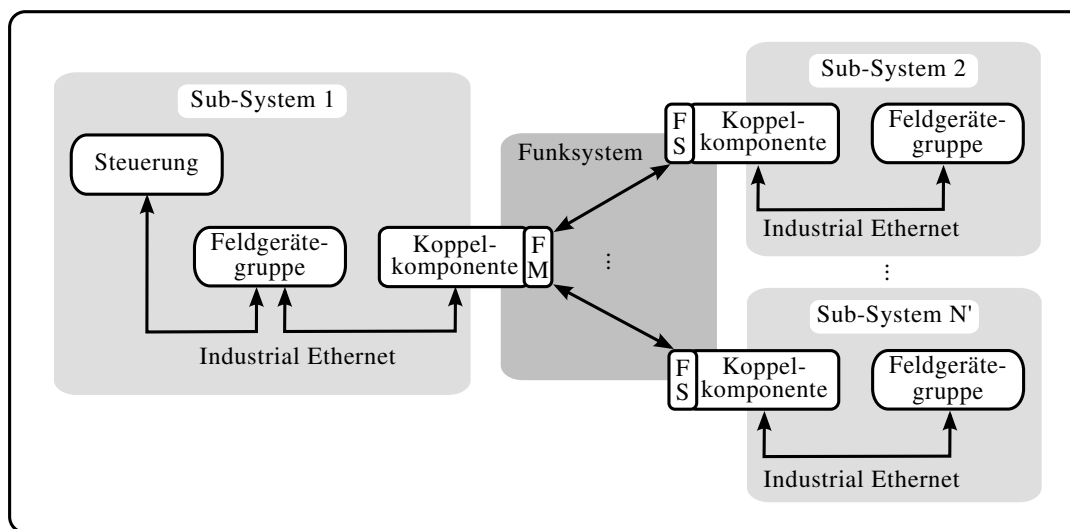


Abbildung 6.5.: Systemarchitektur eines hybriden Kommunikationssystems.

Anforderungsprofilen (siehe Abschnitt 2.3.2) betreiben können.

Neben dem Verbindungskonzept beinhaltet die Übertragung weiterhin das Vermittlungskonzept für Datenpakete, die entweder explizit zugewiesen oder implizit verteilt werden (siehe Abschnitt 6.2.2). Für die Systemarchitektur des hybriden Kommunikationssystems nach Abbildung 6.5 bietet sich folgende Form der Paketvermittlung: Für die Funkübertragung werden die Datenpakete pro Sub-System aggregiert. Das heißt ein Datenpaket beinhaltet die Daten aller Feldgeräte eines Sub-Systems – Sollwerte für die eine und Istwerte für die andere Übertragungsrichtung. Im Sinne der impliziten Paketvermittlung ersetzen auf diesem Wege wenige große Datenpakete eine Vielzahl kleiner Datenpakete. Theoretisch geht diese Datenaggregation mit einer Vereinheitlichung der QoS für die Nutzdaten verschiedener Feldgeräte eines Sub-Systems einher. In der Praxis findet diese Vereinheitlichung bereits innerhalb des Industrial-Ethernet-Systems statt. Wie Abschnitt 3.2.1 und Abschnitt 7.1.2.2.2 zeigen, werden unabhängig vom Gerätetyp die Nutzdaten der Feldgeräte in den Multi-Device-Frames des Summenrahmenprotokolls aggregiert. Folglich kommt der Koppelkomponente im hybriden Kommunikationssystem vielmehr die Funktion einer Datumsortierung als einer -aggregation zu.

Innerhalb eines Sub-Systems sind die einzelnen Feldgeräte einer Feldgerätegruppe in Linientopologie angeordnet. Im Funksystem kommt mit den Mehrpunktverbindungen eine Sterntopologie zum Einsatz. Folglich bildet sich aus Sicht des Gesamtsystems eine Topologie mit  $N' - 1$  parallelen Linien, die als Stichleitungen einer rein drahtgebundenen Installation interpretiert werden können.

Darüber hinaus bietet die Systemarchitektur nach Abbildung 6.5 die Möglichkeit, pro Sub-System unterschiedliche drahtgebundene Kommunikationssysteme zu betreiben. Dieser Ansatz scheint vielversprechend, erlaubt er pro Gerätegruppe die jeweils geeignetsten Systemkomponenten einzusetzen. Dem gegenüber steht – wie bereits in der technischen Bestandsaufnahme diskutiert – eine unzureichende Kompatibilität zwischen den Anwendungs- und Feldbus-

/Industrial-Ethernet-Profilen unterschiedlicher Hersteller, sodass ein echter Mischbetrieb von Kommunikationssystemen und Anwendungskomponenten nach wie vor ineffizient erscheint, unabhängig vom Einsatz funkbasierter Technologien.

Ferner steht die Systemarchitektur nach Abbildung 6.5 der Kopplung eines einzelnen Feldgeräts durch Integration des FS unmittelbar im Feldgerät nicht im Weg. Dieser Ansatz wird als potenzielle Entwicklungsmöglichkeit bestehender legacy Systemkomponenten in Abschnitt 11 erwogen. Dennoch wird hier weiterhin der Einsatz von Funkbrücken verfolgt, da damit zum einen bestehende legacy Komponenten adhoc verwendet, und zum anderen über eine einzige Funkverbindung ganze Gerätegruppen samt mehrerer Feldgeräte angebunden werden können. Funktional stellt die Funkbrücke somit keine Einschränkung dar, sofern sie die Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Echtzeitfähigkeit durch den erhöhten Koppelaufwand erbringt.

Die vorgestellte Systemarchitektur bietet zum einen die Möglichkeit, bestehende Systeme durch den Einsatz von Koppelkomponenten zu erweitern. Zum anderen kann ein System dahingehend flexibel ausgelegt werden, die Gesamtzahl der Feldgeräte derart auf Feldgerätegruppen zu verteilen, sodass die Anzahl  $N' - 1$  benötigter Funkverbindungen als abhängige Größe formuliert werden kann. Diese Fragestellung wird im Rahmen der Fallstudienbetrachtung mittels der Simulationsstudie in Teil III am praktischen Beispiel erörtert.

## 7. Entwurf eines hybriden Kommunikationssystems

Im vorherigen Kapitel 6 wurde die Systemarchitektur eines hybriden industriellen Kommunikationssystems definiert. Eingebettet in diesen Rahmen wird in diesem Kapitel der Entwurf des hybriden Kommunikationssystems verfeinert.

Zu diesem Zweck wird in Abschnitt 7.1 zunächst das Design der Koppelkomponente des Kommunikationssystems ausgearbeitet. Unter anderem umfasst dies die Bewertung und Auswahl von Funktechnologien als auch die Einbettung an bestehende, drahtgebundene industrielle Kommunikationssysteme. Im Anschluss an den Entwurf der Koppelkomponente werden in Abschnitt 7.2 die wichtigen Querschnittsfunktionen des Systems diskutiert und Lösungen zur Umsetzung präsentiert. Dazu gehören Verfahren zur Synchronisation, Möglichkeiten zur Optimierung der Leistungsfähigkeit und Aspekte zum Engineering eines hybriden industriellen Kommunikationssystems.

### 7.1. Komponenten des Kommunikationssystems

Wie Abbildung 6.5 zeigt, beinhaltet die Systemarchitektur eines hybriden industriellen Kommunikationssystems eine Reihe verschiedener Systemkomponenten. Gemäß der Anforderung nach einer nahtlosen Integration funkbasierter Komponenten in bestehende, drahtgebundene Kommunikationssysteme, können mit dieser Systemarchitektur existierende legacy Geräte eingesetzt werden. Unter legacy Geräten sind in diesem Kontext Komponenten zu verstehen, die selbst keine Erweiterung hinsichtlich funkbasierter Komponenten implementieren und zudem unabhängig von der Präsenz funkbasierter Erweiterungen im Gesamtsystem betrieben werden können. Zu legacy Geräten gehören beispielsweise Steuerungen und Feldgeräte.

Neben legacy Geräten beinhaltet die Systemarchitektur des hybriden industriellen Kommunikationssystems die Koppelkomponenten. Sie realisieren die Schnittstelle zwischen dem drahtgebundenen legacy System und der funkbasierten Erweiterung. Die im folgenden diskutierten Systemkomponenten umfassen all die Bestandteile der Koppelkomponente entsprechend ihres Aufbaus nach Abbildung 6.4.

#### 7.1.1. Funktechnologie der Koppelkomponente

Für den Entwurf der Funktechnologie der Koppelkomponente werden zwei Ansätze verfolgt. Zum einen werden in Abschnitt 7.1.1.1 existierende Funkstandards betrachtet und hinsichtlich ihrer Eignung für die gegebenen Anforderungen bewertet. Hierzu dienen die Schlussfolgerungen aus der technischen Bestandsaufnahme (siehe Abschnitt 3.3) als auch die Analysen zu den Parametermodellen (siehe Abschnitt 5.4) als Entscheidungsvorlagen für die Auswahl einer geeigneten Funktechnologie. Losgelöst von Funkstandards werden zum anderen in Abschnitt 7.1.1.2

die Eigenschaften einer Funktechnologie beschrieben, die eine idealtypische Lösung für die Anforderungen industrieller Anwendungen der Feldebene der Fertigungsautomatisierung darstellt.

#### 7.1.1.1. Leistungsfähigkeit der IEEE-802.xx-Familie

Aus Diskussionen zum Stand der Technik und zur Frequenzregulierung geht als Ergebnis hervor, dass von den existierenden Funkstandards die in den ISM-Bändern operierende IEEE-802.xx-Familie die vielversprechendsten Technologien bereitstellt. Die Funkkomponenten basieren auf WLAN-, Bluetooth- und WPAN-Bausteinen und deren zugrunde liegenden Funkstandards IEEE 802.11 [58], IEEE 802.15.1 [67] und IEEE 802.15.4 [18].

Die Leistungsfähigkeit der IEEE-802.xx-Familie wird im folgenden bewertet – insbesondere hinsichtlich der Anforderungsprofile industrieller Anwendungen und deren relevanter Kenngrößen wie dem Datenratenbedarf  $r_{x,n}$  und der Übertragungslatenz  $D_{x,n}$ . Die Bewertung der Synchronisationsverfahren mittels des Jitters  $\gamma$  und der Zuverlässigkeit der Übertragung mittels der Paketverlustrate  $PLR$  erfolgt in Abschnitt 7.2, in dem die Querschnittsfunktionen des hybriden Kommunikationssystems diskutiert werden.

##### 7.1.1.1.1. Datenratenbedarf vs. Systemkapazität

Abbildung 7.1 veranschaulicht den Gesamtdatenratenbedarf  $R_{app}$  industrieller Anwendungen der Feldebene über der Knotenzahl  $N$ . Der Gesamtdatenratenbedarfs  $R_{app}$  leitet sich gemäß Gleichung (2.1) vom Datenratenbedarf  $r_{x,n}$  pro Übertragungsrichtung  $x$  und pro Netzknoten  $n$ , sowie der Anzahl der Netzknoten  $N$  einer Anwendung ab. Für die in Abbildung 7.1 aufgeführte Kurvenschar stellt  $r_{x,n}$  einen Parameter dar, der entsprechend der typischen Anforderungsprofile gewählt wird. Auf diese Weise wird der Gesamtdatenratenbedarf  $R_{app} = f_{r_{x,n}}(N)$  über der Knotenzahl  $N$  einer Anwendung ausgedrückt.

Ferner wird für jede Kurve  $R_{app} = f_{r_{x,n}}(N)$  in Abbildung 7.1 der Arbeitsbereich hervorgehoben, der den typischen Knotenzahlen  $N$  des jeweiligen Anforderungsprofils entspricht. So ergibt sich für die Profile (a-1) und (b-1) ein Gesamtdatenratenbedarf  $R_{app} < 50$  kbps, für Profil (c-1) ist  $R_{app} > 1$  Mbps erforderlich.

Im Schichtenmodell der Feldebene bietet die Kommunikations- der Anwendungsschicht ihren Service über den SAP. Diesem Schichtenmodell stellt nun Abbildung 7.2 den Protokollstapel einer IEEE-802.xx-basierten Funkkomponente gegenübergestellt. Der folgenden Analyse liegt ferner die Annahme zugrunde, dass die Konvergenzschicht unbesetzt bleibt, was für die Evaluierung der Funktechnologie eine valide Annahme ohne Einschränkung darstellt.

Gemäß Anforderung soll die Kommunikationsschicht den Datendurchsatz  $R_{thr}$  bereitstellen, sodass gilt

$$R_{thr} \geq R_{app}. \quad (7.1)$$

Der Datendurchsatz  $R_{thr}$  eines Funksystems ist durch zwei wesentliche Bestandteile charakterisiert, zum einen durch das Radiomodul, zum anderen durch den Protokolloverhead. Dabei sind unter dem Radiomodul die Eigenschaften der Bitübertragungsschicht einer Funktechnologie zu verstehen, die schließlich die Systemkapazität, sprich die Spitzendatenrate  $R_{peak}$  einer Funktechnologie, die temporär auf der Luftschnittstelle erzielt werden kann, bestimmen. Die Systemkapazität ist dabei durch die spektrale Effizienz  $\eta$  und die nutzbare Bandbreite  $B_{op}$  des

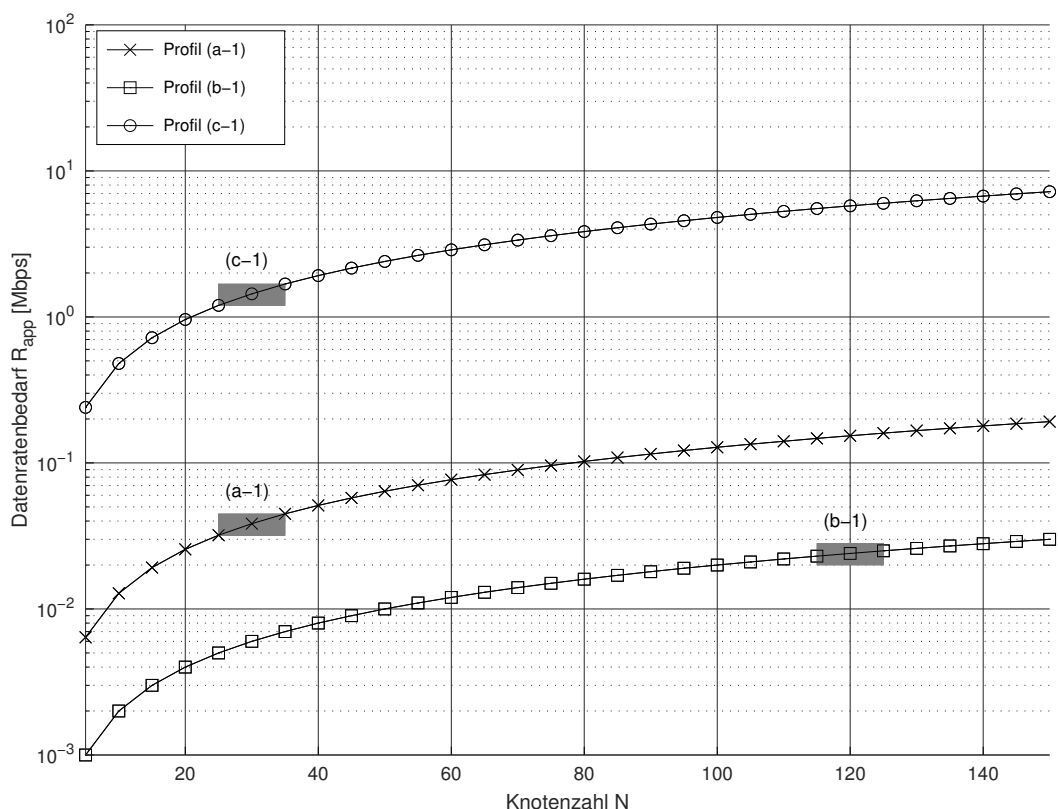


Abbildung 7.1.: Gesamtdatenratenbedarf  $R_{app}$  der industriellen Anwendung über der Knotenzahl  $N$  für verschiedene Anforderungsprofile (siehe Abschnitt 2.3.2).

Funksysteme wie folgt definiert

$$R_{peak} = \eta \cdot B_{op}. \quad (7.2)$$

Die spektrale Effizienz gibt ein Maß dafür, wie gut eine Funktechnologie, genauer gesagt ein Radiomodul und dessen Bitübertragungsschicht Daten übertragen kann, bezogen auf die physikalischen Ressourcen des Übertragungskanal. Entsprechend lautet die Einheit der spektralen Effizienz  $[\eta] = \frac{\text{bit}}{\text{sHz}}$ . Zur spektralen Effizienz tragen Parameter wie

- die Anzahl der Zustände  $M_s$  des Modulationsalphabets bei. Damit wird festgelegt, wie viel Information (Bit) mit einem Datensymbol übertragen wird.
- die Art der Kanalcodierung beziehungsweise die Coderate  $r_c$ , mit der uncodierte Nutzdaten in codierte Daten umgesetzt werden.
- die Anzahl der parallel übertragenen Datenströme  $N_{str}$ , die durch den Einsatz von MIMO-Verfahren möglich sind.

Die spektrale Effizienz  $\eta$  kann damit wie folgt beschrieben werden

$$\eta = r_c \cdot \log_2(M_s) \cdot N_{str}. \quad (7.3)$$

Darüber hinaus werden bei modernen, breitbandigen Funksystemen Frequenzkanäle parallel genutzt, so beispielsweise bei Funksystemen, die als Mehrträgersysteme ausgelegt sind. Für

eben diese Mehrträgersysteme muss das sogenannte Schutzintervall berücksichtigt werden, das einem jeden Mehrträgersymbol beigelegt wird. Die Länge des Schutzintervalls wird durch den Anteil  $\alpha_{guard}$  bezogen auf ein Symboldauer angegeben. Eine eingehendere Diskussion der Wirkweise von OFDM und dem Schutzintervall folgt im Rahmen der Umsetzung eines idealtypischen Mehrträgersystems (siehe Abschnitt 7.1.1.2.3). Für die spektrale Effizienz  $\eta_{mc}$  eines Mehrträgersystems gilt

$$\eta_{mc} = \frac{\eta}{1 + \alpha_{guard}}. \quad (7.4)$$

Demnach verkleinert sich die spektrale Effizienz durch Nutzung eines Schutzintervalls. Damit kann Gleichung (7.2) nun ebenso für Mehrträgersysteme formuliert werden

$$\begin{aligned} R_{peak} &= \eta_{mc} \cdot B_{op} \\ &= \frac{\eta}{1 + \alpha_{guard}} \cdot \underbrace{B_{op}}_{N_{sub} \cdot B_{sub}} \\ &= \eta \cdot N_{sub} \cdot \underbrace{\frac{B_{sub}}{1 + \alpha_{guard}}}_{T_{sym}}, \end{aligned} \quad (7.5)$$

mit der Anzahl  $N_{sub}$  von Unterträgern und dem Abstand der Unterträger  $B_{sub}$ . Mit der Dauer  $T_{sym}$  eines Mehrträgersymbols gemäß

$$\begin{aligned} T_{sym} &= \underbrace{T_{user}}_{\text{Nutzdaten}} + \underbrace{T_{guard}}_{\text{Schutzintervall}} \\ &= \frac{1}{B_{sub}} + \frac{\alpha_{guard}}{B_{sub}} \\ &= \frac{1 + \alpha_{guard}}{B_{sub}}, \end{aligned} \quad (7.6)$$

ergibt sich aus Gleichung (7.5) schließlich

$$R_{peak} = \eta \cdot \frac{N_{sub}}{T_{sym}}. \quad (7.7)$$

Sowohl die spektrale Effizienz  $\eta$  – beziehungsweise  $\eta_{mc}$  – als auch die nutzbare Bandbreite  $B_{op}$  stellen fundamentale Kenngrößen einer Funktechnologie dar, die durch Funkstandards sowie durch Vorgaben von Regulierungsbehörden unveränderlich sind beziehungsweise physikalische Schranken für die Performance der Systemkapazität  $R_{peak}$  darstellen.

Neben der Systemkapazität, die die maximale, temporäre Spitzendatenrate einer Funktechnologie unter idealen Bedingungen ausdrückt, ist weiterhin der Protokolloverhead zu berücksichtigen, der mit der zusätzlichen Datenrate  $R_{proto}$  modelliert wird und ebenso in Abbildung 7.2 aufgeführt ist. Mit  $R_{proto}$  wird der gesamte Overhead zusammengefasst, der aus Funkprotokollen resultiert, die über der Bitübertragungsschicht der Funktechnologie liegen. Dies umfasst den tatsächlichen Overhead durch Signalisierungsdaten, die in der Sicherungsschicht durch die zugehörigen Protokolle den Nutzdaten im Datenpaket hinzugefügt werden, als auch den Overhead, der durch Sendeversuche beziehungsweise Paketwiederholungen entsteht. In Kombination

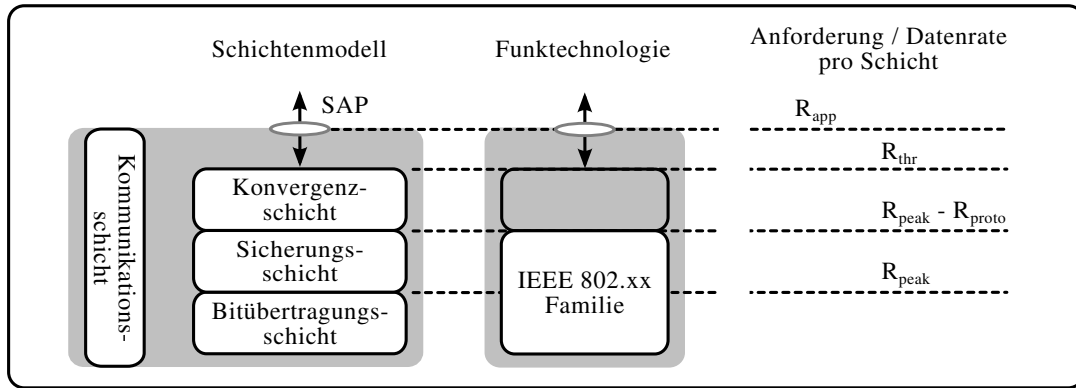


Abbildung 7.2.: Die IEEE-802.xx-Familie im industriellen Schichtenmodell der Feldebene.

mit Gleichung (7.1) erhält man schließlich folgenden Zusammenhang

$$\begin{aligned} R_{peak} - R_{proto} &\geq R_{thr} \\ R_{thr} &\geq R_{app} \end{aligned} \quad (7.8)$$

Aus Gleichung (7.8) folgt, dass eine Funktechnologie notwendigerweise so viel Systemkapazität  $R_{peak}$  bereitstellen muss, dass trotz allem Protokolloverheads  $R_{proto}$ , der insbesondere durch reale Übertragungsbedingungen und einhergehende Paketwiederholungen beeinflusst wird, ausreichend Datendurchsatz  $R_{thr}$  für die Anwendung und ihren Gesamtdatenratenbedarf  $R_{app}$  zur Verfügung steht. Aus der Literatur [39] [42] liegen Erfahrungswerte für Paketwiederholungen bei Funksystemen im industriellen Kontext vor. Dort werden bis zu 7 Paketwiederholungen berücksichtigt, um eine Robustheit der Datenübertragung von  $PLR < 10^{-9}$  zu erreichen. Im verwendeten Modell resultiert das in einer Heuristik von  $R_{proto} \approx 6/7 \cdot R_{peak}$ , womit sich Gleichung (7.8) zu

$$1/7 \cdot R_{peak} \geq R_{thr} \geq R_{app} \quad (7.9)$$

aktualisiert. Anders formuliert sollte ein Funksystem somit mindestens eine etwa siebenfach so hohe Systemkapazität  $R_{peak}$  bereitstellen, gemessen an dem Gesamtdatenratenbedarf  $R_{app}$  einer Anwendung.

Tabelle 7.1 fasst die Performance der IEEE-802.x-Familie hinsichtlich ihrer Systemkapazität  $R_{peak}$  zusammen und gibt dazu die nach Gleichung (7.2) und Gleichung (7.5) in die Systemkapazität einfließenden Kenngrößen an. Hierbei bietet der Funkstandard IEEE 802.11 innerhalb der IEEE-802.x-Familie die meisten Freiheitsgrade. So lassen sich Coderate, Modulationsschema, Systembandbreite wie auch die Anzahl der Datenströme flexibel konfigurieren. Tabelle 7.1 zeigt eine Auswahl der möglichen Konfigurationen. Das hier betrachtete IEEE 802.11n [68] implementiert dabei ein OFDM-basiertes Mehrträgersystem, das mit einer Symboldauer  $T_{sym} = 4 \mu s$ , einem Unterträgerabstand von  $B_{sub} = 312,5 \text{ kHz}$  und einem 25 %-igen Overhead ( $\alpha_{guard}$ ) für das Schutzintervall einhergeht. An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass die tatsächliche, nutzbare Bandbreite  $B_{op}$  unterhalb der vom Standard vorgegeben Systembandbreite  $B_{sys}$  liegt, die bei IEEE 802.11n mit 20 MHz beziehungsweise 40 MHz einnimmt. Typischerweise gilt in diesem Kontext  $B_{sys} = B_{op} \cdot (1 + \alpha_{op})$  mit dem Overhead  $\alpha_{op}$ , der für die Instandhaltung eines Funknetzwerks benötigt wird. Hierunter fallen insbesondere Einschränkungen für die Schutzbänder am Rande des nutzbaren Spektrums,



Tabelle 7.1.: Kenngrößen zur Systemkapazität  $R_{peak}$  der IEEE-802.xx-Familie.

Standard	$R_{peak}$ [Mbps]	$B_{op}$ [MHz]	$r_c$	$M_s$	$N_{str}$	Kommentar
802.11n [68]	6,5	16,25	1/2	2 (BPSK)	1	Robustes Schema
	13	16,25	1/2	4 (QPSK)	1	Modulation
	19,5	16,25	3/4	4 (QPSK)	1	Coderate
	39	16,25	3/4	4 (QPSK)	2	2x2 MIMO
	65	16,25	5/6	64 (64-QAM)	1	Modulation
	81	33,75	3/4	16 (16-QAM)	1	Systembandbreite
	243	33,75	3/4	64 (64-QAM)	2	2x2 MIMO
	540	33,75	5/6	64 (64-QAM)	4	4x4 MIMO
802.15.1 [67]	1	1	1	2 (GFSK)	1	Bluetooth BR
	3	1	1	8 (8-DPSK)	1	Bluetooth EDR
802.15.4 [18]	0.25	2	1	4 (O-QPSK)	1	plus Spreizung

in denen beispielsweise die Abstrahlcharakteristika eines Transmitters Berücksichtigung finden.

Ausgehend von dem robustesten Grundschema mit  $R_{peak} = 6,5$  Mbps erreicht IEEE 802.11n eine maximale Systemkapazität  $R_{peak} > 500$  Mbps, wozu sowohl eine höhere Coderate, eine größere nutzbare Bandbreite als auch mehrere parallele Datenströme verwendet werden. Aufgrund des Mehrträgerverfahrens OFDM resultiert eine Erhöhung der nutzbaren Bandbreite schlicht in einer größeren Anzahl an Unterträgern. Darüber hinaus bietet IEEE802.11n die Möglichkeit, die Schutzintervalle zwischen den OFDM-Symbolen zu verkürzen, was zu einer weiteren Erhöhung der Systemkapazität führt, hier aber nicht weiter betrachtet wird, da die Robustheit, insbesondere bei Mehrwegeausbreitung leiden würde. Darüber hinaus existiert mit IEEE 802.11ac bereits eine Weiterentwicklung von IEEE 802.11n, die neuerlich eine Steigerung der Systemkapazität mit sich bringt. Auf diese Steigerung wird in dieser Arbeit bewusst verzichtet, da der Leistungszugewinn zum einen für die Anforderungen hinsichtlich des Datenratenbedarfs nicht erforderlich ist, zum anderen eine größere Auswahl von IEEE-802.11n-basierten Funkkomponenten für die Hardwareplattform des Demonstratorsystem in Teil III der Arbeit zur Verfügung steht.

Im Gegensatz zu IEEE 802.11n stellen die Funkstandards IEEE 802.15.4 und IEEE 802.15.1 mit ihren verfügbaren Bandbreiten von  $B_{op} = 2$  MHz und 1 MHz schmalbandigere Funkssysteme dar. Folgerichtig fällt bei Bluetooth auch wegen der Verwendung robuster Modulationsschemata wie Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK) und Differential Phase Shift Keying (DPSK) die Systemkapazität für die Variante Bluetooth BR und EDR mit 1 Mbps und 3 Mbps entsprechend gering aus. Hier sei ferner darauf verwiesen, dass diese Werte der Systemkapazität keine Codierung der Nutzdaten beinhalten ( $r_c = 1$ ). Der Bluetooth-Standard spezifiziert die Codierung von Nutzdaten als optionales Feature. Lediglich die Codierung der Header-Daten ist obligatorisch. In ähnlicher Weise wie bei Bluetooth ist auch die Bitübertragungsschicht von IEEE 802.15.4 für eine robuste Übertragung ausgelegt. In diesem Fall wird Robustheit durch Spreizung des Datensignals im Zeitbereich mit DSSS erreicht.

Tabelle 7.2.: Bewertung der Systemkapazität  $R_{peak}$  der IEEE-802.xx-Familie hinsichtlich der Anforderungsprofile industrieller Anwendungen.

Anforderungsprofil	$R_{app}$ [kbps]	IEEE-Standard		
		802.11n	802.15.1	802.15.4
(a-1)	38	●	●	-
(b-1)	24	●	●	○
(c-1)	1440	●	-	-

Nach Betrachtung der Systemkapazitäten der IEEE-802.x-Familie fasst Tabelle 7.2 die Ergebnisse dieses Abschnitts zusammen. Es ist festzuhalten, dass einzig das breitbandige IEEE 802.11n den Anforderungen des Gesamtdatenratenbedarfs  $R_{app}$  aller Anforderungsprofile genügt. Die Werte für  $R_{app}$  berechnen sich dabei über Gleichung (2.1), worin wiederum die Anzahl  $N$  der Feldgeräte und der Datenratenbedarf  $r_{x,n}$  pro Feldgerät und Übertragungsrichtung aus Tabelle 2.2 eingehen. Die angegebenen Werte für  $R_{app}$  entsprechen so den hervorgehobenen Arbeitspunkten für jedes Anforderungsprofil in Abbildung 7.1. Zusätzlich wird in Tabelle 7.2 die Bewertung des jeweiligen IEEE-Standards bezüglich der Anforderungsprofile über Gleichung (7.9) und die verfügbare Systemkapazität  $R_{peak}$  abgeschätzt. Demgemäß bietet IEEE 802.11n hinreichend Systemkapazität für alle Anforderungsprofile. Die Systemkapazität von Bluetooth nach IEEE 802.15.1 reicht für Profil (b-1) und Profil (a-1), nicht aber für Profil (c-1). Die Bitübertragungsschicht von IEEE 802.15.4 bietet gänzlich zu wenig Systemkapazität und reicht mit wenig Marge noch für Profil (b-1).

Für die weiterführenden Analysen zur Echtzeitfähigkeit liegt der Fokus im folgenden auf dem Funkstandard IEEE 802.11.

7.1.1.1.2. Latenz und Echtzeitfähigkeit

Für die Bewertung der Echtzeitfähigkeit von IEEE 802.11 werden die im Kontext der Latenzmodellierung erarbeiteten theoretischen Modelle (siehe Abschnitt 5.4.1.2) angewendet. Ferner unterstützt IEEE 802.11 zwei grundlegende Verfahren für den Medienzugriff:

- *Dezentral geregelter Medienzugriff*: Diese Form des Medienzugriffs basiert auf dem CS-MA/CA und wird im IEEE 802.11 Standard als DCF – mit der Erweiterung von IEEE 802.11e als EDCA – bezeichnet. Das grundlegende Schema des dezentral geregelten Medienzugriffs veranschaulicht Abbildung 5.8a, das spezifische Schema von EDCA Abbildung 5.9.
- *Zentral geregelter Medienzugriff*: Diese Form des Medienzugriffs basiert auf Polling und wird in IEEE 802.11 als PCF – mit der Erweiterung von IEEE 802.11e als HCCA – bezeichnet. Das grundlegende Schema des zentral geregelten Medienzugriffs mit Polling veranschaulicht Abbildung 5.8b .

Bewertung der Übertragungslatenz

Für einen IEEE-802.11n-basierten Kanal mit der Systemkapazität 6,5 Mbps, dessen Medienzugriff durch EDCA geregelt wird, stellt Abbildung 7.3 die Übertragungslatenzen  $D_{c,n}$  und  $D_{a,n}$

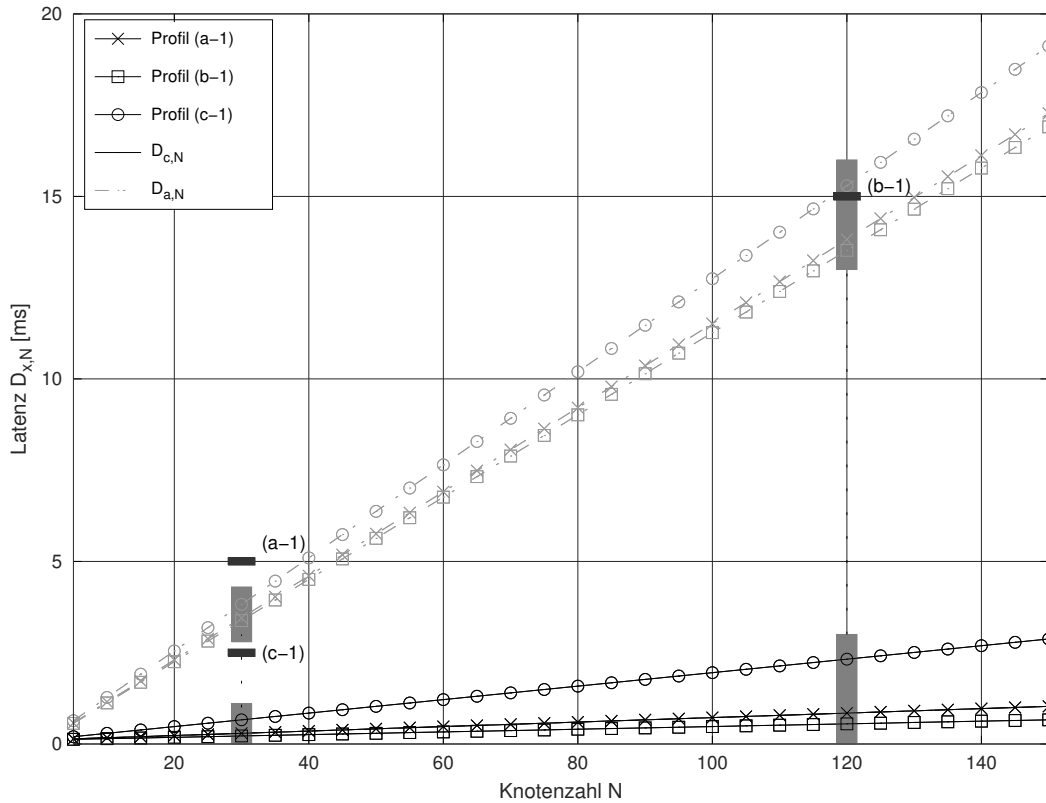


Abbildung 7.3.: Übertragungslatenzen  $D_{x,N}$  über der Knotenzahl  $N$  für Anforderungsprofile, Medienzugriffsverfahren EDCA nach IEEE 802.11n mit  $R_{peak} = 6,5$  Mbps.

für die Übertragung von Soll- und Istwerten ausgewählter industrieller Anforderungsprofile über der Knotenzahl  $N$  dar. Als physikalisches Verbindungskonzept wird eine Mehrpunktverbindung betrachtet. Die zentrale Steuerung ist über den Funk-Master – im Kontext von IEEE 802.11 entspricht der Funk-Master dem AP – und dessen  $N$  Funk-Slaves – den Clients – mit  $N$  Feldgeräten verbunden. Dies stellt einen Spezialfall der allgemeinen Systemarchitektur nach Abbildung 6.5 dar, bei dem jedes Sub-System genau ein Feldgerät beinhaltet.

Die resultierenden Übertragungslatenzen  $D_{c,N}$  und  $D_{a,N}$  sind mit Gleichungen (5.10) und (5.11) beschrieben. Der Analyse der Übertragungslatenzen liegen dabei Annahmen zugrunde, die in Tabelle 7.3 zusammengefasst sind.

Die Kurvenverläufe in Abbildung 7.3 zeigen deutlich, dass die Übertragungslatenzen  $D_{a,N}$  der Istwerte für jedes Anforderungsprofil signifikant größer sind als die entsprechenden Übertragungslatenzen  $D_{c,N}$  der Sollwerte. Die Ursache hierfür liegt darin, dass die Übertragung der Sollwerte zu den  $N$  Clients in der physikalischen Mehrpunktverbindung als Broadcast modelliert wird, während die Istwerte der Clients als  $N$  separate Datenpakete übertragen werden. In Folge dessen wird die Istwert- im Vergleich zur Sollwertübertragung mit dem  $N$ -fachen Datenoverhead beaufschlagt.

Ferner hebt Abbildung 7.3 die Arbeitspunkte der Anforderungsprofile hinsichtlich ihrer Knotenzahl  $N$  durch die grau unterlegten Bereiche hervor – konkret gilt für die Profile

Tabelle 7.3.: Annahmen für die analytische Bewertung von IEEE 802.11n.

Eigenschaft	Beschreibung
Robustheit	Keine Übertragungsfehler ( $PER = 0$ ) Keine Paketwiederholungen
Determinismus	Keine zufälligen Wartezeiten (Backoff $BO$ mit $CW = CW_{min}$ )
Medienbelastung	Keine Last auf dem Medium
Sollwertübertragung	implizite Paketverteilung physikalische Mehrpunktverbindung
Istwertübertragung	explizite Paketzuweisung physikalische Mehrpunktverbindung

(a-1) und (c-1)  $N \approx 30$  und für Profil (b-1)  $N \approx 120$ . Ebenso werden die entsprechenden Schranken für die Übertragungslatenz durch die schwarzen Balken für jedes Profil dargestellt. Demnach liegen für die vorliegenden Systemkonfigurationen die Übertragungslatenzen  $D_{c,N}$  aller Profile unterhalb der jeweils geforderten Schranke. Für die Istwertübertragung halten die Übertragungslatenzen  $D_{a,N}$  bei den Profilen (a-1) und (b-1) die Schranken knapp beziehungsweise mit geringer Marge ein, für Profil (c-1) wird die Schranke hingegen überschritten.

Für die gleichen Systemkonfigurationen wie in Abbildung 7.3 zeigt nun Abbildung 7.4 das Verbesserungspotenzial im Hinblick auf die Übertragungslatenz  $D_{x,N}$  für den Fall, dass die Systemkapazität bis zu ihrem durch den Standard IEEE 802.11n vorgegebenen Maximum von  $R_{peak} = 540$  Mbps – siehe auch Tabelle 7.1 – erhöht wird. Dazu wird das resultierende Verbesserungspotenzial  $1 - D_{x,N}/D_{x,N}^{ref}$  als relative Größe bezüglich  $D_{x,N}^{ref} = D_{x,N}|_{6,5 \text{ Mbps}}$  definiert.

Zunächst veranschaulicht Abbildung 7.4, dass mit steigender Systemkapazität  $R_{peak}$  die Übertragungslatenz  $D_{x,N}$  prinzipiell verringert werden kann, also eine relative Verbesserung gemäß der Kurvenverläufe zu beobachten ist. Insbesondere die Sollwertübertragung mit  $D_{c,N}$  profitiert von der höheren Systemkapazität. So kann abhängig vom konkreten Anforderungsprofil bei einer Verdreifachung der Systemkapazität – von  $R_{peak}^{ref} = 6,5$  Mbps auf  $R_{peak}^{ref} = 19,5$  Mbps – eine Verbesserung für  $D_{c,N}$  von mehr als 40 % für Profil (a-1) und mehr als 50 % für die Profile (b-1) und (c-1) erzielt werden.

Im Gegensatz zur Sollwertübertragung profitiert die Übertragungslatenz  $D_{a,N}$  der Istwertübertragung weit weniger von einer Erhöhung der Systemkapazität. So bleibt der Performancegewinn für  $D_{a,N}$  selbst bei der maximalen Systemkapazität von  $R_{peak} = 540$  Mbps deutlich unter 20 % unabhängig vom gewählten Anforderungsprofil.

### Effizienz der Datenübertragung

Die Begrenzung des Verbesserungspotenzials bei steigender Systemkapazität gründet darin, dass die Systemkapazität beziehungsweise die Spitzendatenrate  $R_{peak}$  nur auf die instantane Übertragung der Nutzdaten wirkt. Eben diese Zeitdauer wird in Abschnitt 5.4.1.2 mit der Übertragungsverzögerung  $D_{BW}$  modelliert. Die aus Übertragungsprotokollen resultierenden

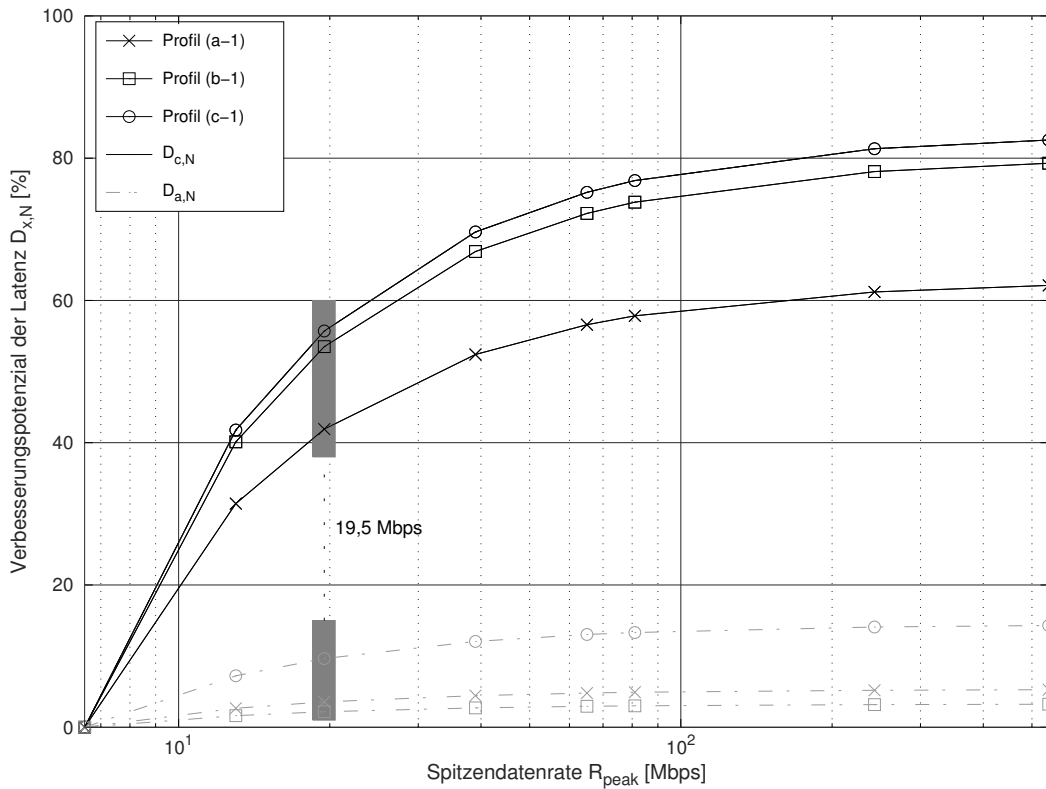


Abbildung 7.4.: Verbesserungspotenzial der Übertragungslatenz  $D_{x,N}$  bezogen auf den Referenzwert  $D_{x,N}|_{6,5 \text{ Mbps}}$  über der Systemkapazität  $R_{peak}$ , Medienzugriffsverfahren EDCA nach IEEE 802.11n.

Wartezeiten  $D_{MAC}$  sowie die Latenzanteile durch den Datenoverhead  $D_{over}$  bleiben von einer Erhöhung des Systemkapazität unberührt.

Da die Istwertübertragung bei der Mehrpunktverbindung durch ihre vielen und kleinen Datenpakete entsprechenden Datenoverhead und Wartezeiten erzeugt, fällt eine ausschließlich auf die Nutzdaten wirksame Erhöhung der Systemkapazität bei der Betrachtung der resultierenden Übertragungslatenz  $D_{a,N}$  kaum ins Gewicht. Dazu zeigt schließlich Abbildung 7.5, wie effizient ein Funkssystem nach IEEE 802.11n mit dem Medienzugriffsverfahren EDCA Nutzdaten gemäß der industriellen Anforderungsprofile übertragen kann. Als Maß der Effizienz wird die Übertragungsverzögerung  $D_{BW}$  der Nutzdaten bezogen auf die Gesamtdauer der resultierende Übertragungslatenz  $D_{x,N}$  der Soll- und Istwertübertragung betrachtet.

Gemäß Abbildung 7.5 nimmt die Übertragungseffizienz  $D_{BW}/D_{x,N}$  mit steigender Systemkapazität ab, was schlicht dadurch begründet ist, dass die Zeitdauern für Wartezeiten und Datenoverhead unverändert bleiben, während sich die Übertragungsverzögerung  $D_{BW}$  bei steigender Systemkapazität  $R_{peak}$  verringert. Bei der Sollwertübertragung entfällt für Systemkapazitäten  $R_{peak} < 20 \text{ Mbps}$  ein signifikanter Anteil der Übertragungslatenz  $D_{c,N}$  auf die Übertragung der Nutzdaten,  $D_{BW}/D_{c,N} > 40 \%$ .

Diesbezüglich ist die Istwertübertragung nach Abbildung 7.5 weniger effizient als die Soll-

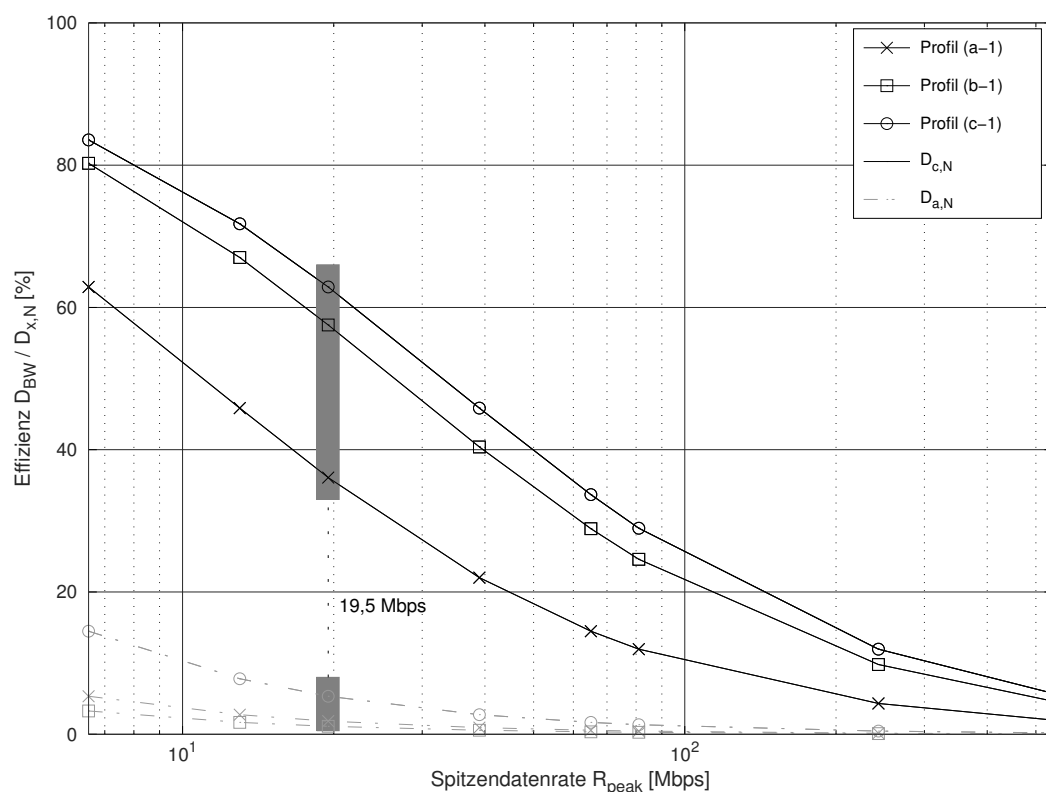


Abbildung 7.5.: Effizienz der Datenübertragung  $D_{BW}/D_{x,N}$  über der Systemkapazität  $R_{peak}$ , Medienzugriffsverfahren EDCA nach IEEE 802.11n.

wertübertragung. Selbst bei der geringsten Systemkapazität  $R_{peak} = 6,5 \text{ Mbps}$  gilt für die Übertragungseffizienz  $D_{BW}/D_{a,N} < 20 \%$ . Betrachtet man die Kurvenverläufe pro Anforderungsprofil genauer, so bleibt die Übertragungseffizienz für die Profile (a-1) und (b-1) sogar unter  $10 \%$ . Ursache dafür ist, dass diese beiden Profile im Vergleich zu Profil (c-1) die geringere Nutzdatenrate  $r_{x,n}$  aufweisen.

### Einzel- vs. Mehrpunktverbindung

Nach Tabelle 7.3 basiert die Evaluierung der Übertragungslatenz bei IEEE 802.11n auf der Annahme von physikalischen Mehrpunktverbindungen. Im folgenden soll die Evaluierung auf Einzelverbindungen erweitert werden.

Das Modell der Systemarchitektur des hybriden industriellen Kommunikationssystems nach Abbildung 6.5 sieht vor, dass ein Kommunikationssystem  $N'$  Sub-Systeme mittels Funkverbindungen koppeln kann. Die  $N$ -Feldgeräte einer Anwendung können prinzipiell beliebig auf diese Sub-Systeme verteilt werden.

Im bislang betrachteten Fall für Mehrpunktverbindungen wird jedes Feldgerät einem eigenen Sub-System zugeordnet, d.h.  $N' = N + 1$ . Im umgekehrten Falle sollen nun alle  $N$  Feldgeräte einer Anwendung einem einzigen Sub-System zugeordnet werden, d.h.  $N' = 2$ . Für eben diesen Fall erhält man im Bezug auf das Funksystem nun eine Funkbrücke, die eine physikalische Einzelpunktverbindung darstellt. Es ist nicht Aufgabe des Funksystems, sondern

Tabelle 7.4.: Bewertung der Echtzeitfähigkeit von IEEE 802.11n

Profil	$D_{x,n}$ [ms]	Mehrpunkt mit		Einzelpunkt mit	
		6,5 Mbps	19,5 Mbps	6,5 Mbps	19,5 Mbps
(a-1)	5	○	○	●	●
(b-1)	15	○	○	●	●
(c-1)	2,5	-	-	●	●

vielmehr der Konvergenzschicht einer Koppelkomponente, die entsprechenden Datenpakete für die Funkbrücke zu schnüren. Für die Übertragungslatenz der reinen Funkbrücke gilt damit  $D_{a,N} = D_{c,N}$ . Als Ergebnis verbessert die Funkbrücke sowohl die Performance der funkbasierten Übertragungslatenz, das Verbesserungspotenzial der Latenz bezüglich einer möglichen Erhöhung der Systemkapazität  $R_{peak}$  sowie die Übertragungseffizienz.

Schlussendlich fasst Tabelle 7.4 die Ergebnisse der Latenzbewertung für IEEE 802.11n zusammen. Im Kern zeigt sich, dass IEEE 802.11n für industrielle Anwendung geeignet sein kann. Diese Eignung ist stark daran gebunden, ob eine industrielle Anwendung die Auslegung ihres Funksystems als Einzelpunktverbindung zulässt. Erfordert eine industrielle Anwendung hingegen die Anbindung vieler Sub-Systeme über funkbasierte Mehrpunktverbindungen, so ist IEEE 802.11n eine nur noch bedingt geeignete Funktechnologie. In den konkret betrachteten Beispielen dieses Abschnitts zeigt insbesondere Abbildung 7.3, dass bereits mit  $R_{peak} = 6,5 \text{ Mbps}$  ausreichend Systemkapazität für die Sollwertübertragung aller Anforderungsprofile – ausgeführt als Einzelpunktverbindung – zur Verfügung steht. Die Istwertübertragung ist bei  $R_{peak} = 6,5 \text{ Mbps}$  abhängig vom Anforderungsprofil mit geringer Marge oder gar nicht realisierbar. Wie Abbildung 7.4 veranschaulicht, bringt ein Erhöhen der Systemkapazität auf beispielsweise  $R_{peak} = 19,5 \text{ Mbps}$  insbesondere für die Istwertübertragung – ausgeführt als Mehrpunktverbindung – keinen signifikanten Performancegewinn für die Übertragungslatenz. Die in Teil III der Arbeit diskutierte Simulationsstudie nimmt diesen Punkt auf und evaluiert quantitativ, bis zu welchem Grade ein Funksystem wie IEEE 802.11n für Mehrpunktverbindungen noch geeignet ist.

Ferner sei darauf verwiesen, dass die Analysen der Übertragungslatenz auf den idealisierten Annahmen in Tabelle 7.3 beruhen und somit eine untere Schranke der Übertragungslatenz für IEEE 802.11n mit dem Medienzugriffsverfahren EDCA darstellen. Berücksichtigt man eine höhere Last auf dem Medium sowie Übertragungsfehler, so erhöhen sich die Übertragungszeiten. Die Schwierigkeit bei EDCA liegt insbesondere darin, dass die dann wirksamen Wartezeiten zufällig bestimmt werden, was im Widerspruch zu den zeitlichen Echtzeitschranken industrieller Anwendungen steht. Mit dem auf Polling basierten Verfahren HCCA bietet die IEEE-802.11-Familie ein weiteres, deterministischeres Medienzugriffsverfahren. Damit kann im Falle von mehrfachen Sendeversuchen eine bessere Vorhersehbarkeit der Übertragungszeiten prädictiert werden. Für den unter den Annahmen nach Tabelle 7.3 betrachteten optimistischen Fall erzielte HCCA durch die zusätzliche Signalisierung über seinen Poll-Request aber eine schlechtere Performance als EDCA.

### 7.1.1.2. Idealtypisch proprietäres Echtzeitfunksystem

Die Auswertung der IEEE-802.xx-Familie zeigt, dass Funkstandards unter gewissen Randbedingungen durchaus geeignet sind, um die Anforderungen industrieller Anwendungen zu erfüllen. Andererseits können auch Fälle identifiziert werden, für die die betrachteten Funkstandards keine geeignete Lösung darstellen, insbesondere wenn die Anzahl der per Funkverbindung anzukoppelnden Feldgeräte und physikalischen Mehrpunktverbindungen steigt. Ausgehend von den Ergebnissen dieser Bewertung werden in diesem Abschnitt die Charakteristika eines für industrielle Anwendungen idealtypischen, echtzeitfähigen Funksystems postuliert. Dazu wird zunächst eine echtzeitfähige Grundstruktur eingeführt. Basierend auf dieser werden deterministische Medienzugriffsschemata abgeleitet und schließlich am Beispiel eines Mehrträgersystems exemplarisch umgesetzt.

#### 7.1.1.2.1. Echtzeitfähige Grundstruktur

Der Gesamtdatenratenbedarf  $R_{app}$  einer industriellen Anwendung wird nach Gleichung (2.1) über die Anzahl  $N$  der Feldgeräte sowie die Datenraten  $r_{c,n}$  und  $r_{a,n}$  der Soll- und Istwerte einer Anwendung pro Feldgerät  $n$  bestimmt. Tabelle 7.2 zeigt die resultierenden Werte von  $R_{app}$  für charakteristische industrielle Anforderungsprofile und bewertet, in wie weit sich Funkstandards mit ihrer Systemkapazität  $R_{peak}$  für das jeweilige Profil eignen.

Betrachtet man die Systemkapazität  $R_{peak}$  genauer, so hängt sie nach Gleichung (7.2) von der nutzbaren Bandbreite  $B_{op}$  und der spektralen Effizienz  $\eta$  eines Funksystems – beziehungsweise den Eigenschaften dessen Radiomoduls – ab. Ein großer Vorteil von IEEE 802.11n besteht darin, dass mit 20 MHz – durch Kanalbündelung gar mit 40 MHz – die höchste Systembandbreite  $B_{sys}$  und einhergehend damit die größte nutzbare Bandbreite  $B_{op}$  der untersuchten Funkstandards im ISM-Band zur Verfügung steht.

Darüber hinaus bietet IEEE 802.11n unterschiedliche Konfigurationsmöglichkeiten, wie die spektrale Effizienz  $\eta$  eines Funksystems eingestellt werden kann. Bei gleicher nutzbarer Bandbreite  $B_{op}$  wirkt dann die spektrale Effizienz unmittelbar auf die Systemkapazität. Im konkreten Beispiel nach Tabelle 7.1 erhöht sich bei gleichbleibender  $B_{op} = 13,25$  MHz durch Umstellen von Coderate (von 1/2 auf 3/4) und Modulation (von Binary Phase Shift Keying (BPSK) auf Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)) die Systemkapazität  $R_{peak}$  von 6.5 Mbps auf 19,5 Mbps. Zugleich impliziert diese Umstellung, dass eine schwächere Kanalkodierung als auch ein weniger robustes Modulationsschema die Robustheit der Datenübertragung einschränken. Im konkreten Beispiel wird mit Coderate 1/2 der Datenübertragung 50 % Redundanz hinzugefügt, mit Coderate 3/4 nur noch 25 %. Diese Redundanz ist ein Maß für den Gewinn, den die Kanalkodierung erzielen kann, um die Übertragung robuster zu machen. Des weiteren wird mit BPSK 1-Bit pro Übertragungssymbol moduliert, während mit QPSK einem jeden Übertragungssymbol 2-Bit aufgeprägt werden. Das erhöht die Systemkapazität, schwächt aber die Robustheit. Folglich stellt die Wahl der spektralen Effizienz  $\eta$  stets einen Kompromiss zwischen der Systemkapazität und der Robustheit der Datenübertragung dar. Soll also ein bestimmtes Maß an Robustheit vorgehalten werden, kann die Systemkapazität nur durch eine Erhöhung der Systembandbreite gesteigert werden.

Ferner zeigen die Auswertungen zur Echtzeitfähigkeit von Funkstandards, dass sich Übertragungslatenzen nicht ohne weiteres durch eine Erhöhung der Systemkapazität verbessern lassen. Als Ursache für die Begrenzung des Verbesserungspotenzials wurde die Effizienz der



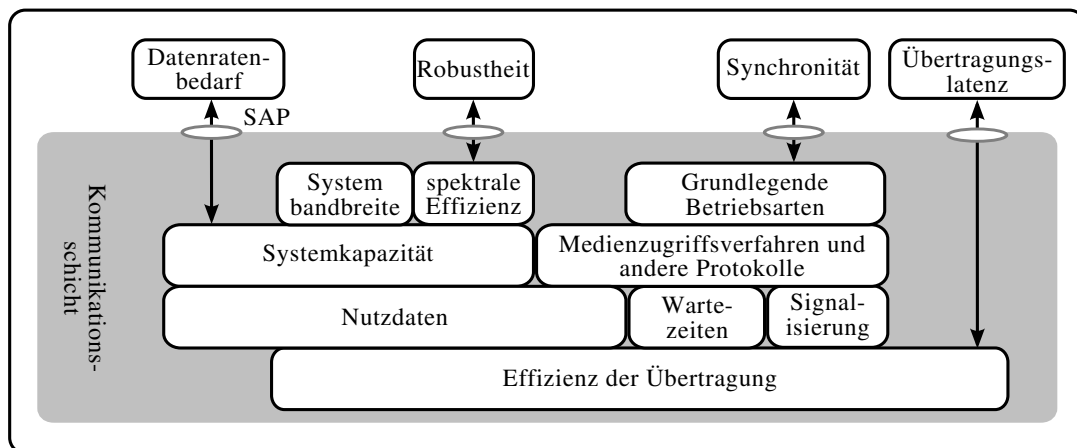


Abbildung 7.6.: Schematischer Überblick zu Abhängigkeiten von Systemeigenschaften eines Kommunikationssystems sowie deren Bezug zu Anforderungen industrieller Anwendungen.

Datenübertragung identifiziert. Die Systemkapazität beeinflusst ausschließlich die Übertragung der Nutzdaten, nicht aber die Übertragung von Overhead in Form von Signalisierungsdaten und Wartezeiten. Für den eingehender untersuchten Funkstandard IEEE 802.11n gehen beispielsweise bei Mehrpunktverbindungen zur Datenübertragung der Istwerte mehr als 80 % der Übertragungslatenz auf das Konto von Overhead (siehe Abbildung 7.5).

Die Ursache von Overhead setzt sich im Kern aus zwei wesentlichen Bestandteilen zusammen: Zum einen fallen für jedes Funksystem Signalisierungsdaten an, die im Zuge von Protokollen den Nutzdaten eines Datenpakets – beispielsweise als Präambel – hinzugefügt, oder als eigenständige Signalisierungspakete – beispielsweise als Poll Request oder als ACK – übertragen werden. Neben den Signalisierungsdaten stellen Wartezeiten den zweiten Bestandteil des Overheads dar. Sie sind durch die Art der Protokolle, insbesondere durch den Medienzugriff eines Funksystems geprägt. Die Wahl des Medienzugriffsverfahrens, im Kern bereits die Frage, ob ein Medienzugriffsverfahren zentral geregelt oder dezentral organisiert wird, ist wiederum abhängig von der grundlegenden Betriebsart eines Funksystems. Asynchrone Netze werden typischerweise mit einem dezentral organisierten Medienzugriff kombiniert, wie bei der IEEE-802.11-Familie mit DCF oder EDCA. Ein zentral geregelter Medienzugriff wird typischerweise in Kombination mit synchronen Netzen eingesetzt, wie beispielsweise im zellularen Mobilfunk. Mit synchronen Netzen gehen wiederum funkbasierte Netzinfrastrukturen einher, deren Aufbau mit höheren initialen Kosten verbunden ist.

Abbildung 7.6 fasst die umschriebenen Abhängigkeiten von Systemparametern, -eigenschaften und Verfahren zusammen und setzt diese in Bezug zu den anwendungsseitigen Anforderungen an ein industrielles Kommunikationssystem. Die schematische Darstellung untermauert beispielsweise, dass die Systemkapazität alleinig dafür verantwortlich zeichnet, den Datenratenbedarf einer Anwendung abzudecken. Andererseits, hängt die Übertragungslatenz in erster Linie von der Effizienz der Übertragung ab, und die wiederum hängt nur zu einem gewissen Anteil von der Systemkapazität ab. Eine Erhöhung der Systemkapazität ist somit kein hinreichendes Kriterium zur Verbesserung der Übertragungslatenz. Die Effizienz der

Tabelle 7.5.: Parameter für echtzeitfähige Grundstruktur.

Parameter	Charakteristik	Beschreibung
$R_{peak}$	$> 10 \text{ Mbps}$	Systemkapazität
$\eta$	$< 2 \frac{\text{bit}}{\text{s Hz}}$	Spektrale Effizienz
$D_{BW}/D_{x,N}$	$> 50 \%$	Effizienz der Übertragung
Netzcharakteristik	Synchron Vollduplex	Grundlegende Betriebsart

Übertragung ist vielmehr durch Signalisierungsdaten und Wartezeiten bestimmt, die wiederum vorrangig vom Medienzugriffsverfahren abhängen. Die Wahl des Medienzugriffsverfahrens ist wiederum zumeist von der grundlegenden Betriebsart eines Netzwerkes beeinflusst.

Des weiteren veranschaulicht Abbildung 7.6 die Komplexität aller und die Abhängigkeiten einzelner Systembausteine zueinander, die in letzter Konsequenz gegeneinander wirken können, sofern ausschließlich auf eine bestimmte Anforderung hin optimiert wird. Erwähnt wurde bereits, dass eine Erhöhung der spektralen Effizienz zwar die Systemkapazität steigert und somit dem Datenratenbedarf einer Anwendung genügen kann. Zugleich aber wirkt sich eine Erhöhung der spektralen Effizienz typischerweise nachteilig auf die Robustheit der Datenübertragung aus. Als freier Parameter wird in diesem Zusammenhang die Systembandbreite identifiziert, die unabhängig von der Robustheit der Datenübertragung zur Erhöhung der Systemkapazität herangezogen werden kann.

Als Ergebnis dieser Betrachtungen kann eine echtzeitfähige Grundstruktur abgeleitet werden, die eine idealtypische funkbasierte Lösung für die Anforderungen industrieller Anwendungen der Feldebene darstellt. Diese idealtypische Lösung stellt ein breitbandiges Funksystem dar, das insbesondere dank seiner Systembandbreite eine ausreichend hohe Systemkapazität bereitstellt. Zugleich gewährleistet die Wahl der spektralen Effizienz eine robuste Datenübertragung. Das idealtypische Funksystem wird in synchroner Betriebsart ausgeführt, sodass ein zentraler Medienzugriff erfolgen kann. Der Koordinator des zentralen Medienzugriffsverfahrens legt feste Übertragungsressourcen für seine Funkteilnehmer fest. Dadurch werden Wettbewerbsphasen um den Medienzugriff und damit einhergehende Wartezeiten vermieden. Der Overhead durch Signalisierungsdaten wird dadurch gering gehalten, dass die Präambeln von Datenpaketen ausschließlich der Kanalschätzung und Nachführung der Zeit- und Frequenzbasis dienen und nicht zur vollständigen Akquise eines asynchronen Datenpakets benötigt werden. Auf diese Weise kann wie bei zellularen Mobilfunksystemen eine hohe Effizienz der Datenübertragung erreicht werden, wie beispielsweise beim Mobilfunkstandards LTE mit einer Effizienz  $> 50 \%$ , wenn man den Overhead durch Pilotsignale, Signalisierungs- und Protokolldaten der geteilten Kontrollkanäle den dedizierten Datenkanälen zur Übertragung von Nutzerdaten gegenüberstellt. Tabelle 7.5 fasst die kennzeichnenden Parameter für eine echtzeitfähige Grundstruktur zusammen.

7.1.1.2.2. Deterministischer Medienzugriff

Ein Bestandteil der idealtypischen, echtzeitfähigen Grundstruktur ist der zentral organisierte Zugriff auf das Übertragungsmedium, der durch feste Ressourcenzuteilung eine determinis-

tische Datenübertragung, ohne Wettbewerbsphase um das Übertragungsmedium, ermöglicht. Für die Wahl des Medienzugriffsverfahrens kann somit auf grundlegende Multiplexverfahren zurückgegriffen werden.

Mit Zeitmultiplex kann der Zugriff auf das Übertragungsmedium durch Zuteilung zeitlicher Ressourcen geregelt werden. Die direkte und einfachste Realisierungsform eines Medienzugriffsverfahrens basierend auf Zeitmultiplex ist TDMA (siehe Abschnitt 3.3.2.1). Voraussetzung für TDMA ist ein synchrones Netzwerk, was durch die echtzeitfähige Grundstruktur gegeben ist. Zum Verständnis, den Eigenschaften und Voraussetzungen eines synchronen Netzwerks im Kontext dieser Arbeit sei auf Anhang B verwiesen. Ferner ist den Funkteilnehmern durch ein Protokoll – ob explizit, oder implizit – zu signalisieren, welcher Zeitschlitz ihnen für die Datenübertragung zugeteilt ist. Für jeden Funkteilnehmer ist nun eine periodische Folge festgelegt, zu der er das Übertragungsmedium exklusiv nutzen kann. Auf diese Weise werden innerhalb des Funksystems keine zufälligen Wartezeiten injiziert. Dennoch kann die Übertragung von Daten Verzögerungen unterliegen, da vom Zeitpunkt der Datenübergabe an der serviceorientierten Schnittstelle zwischen Anwendungs- und Kommunikationsschicht auf den exklusiv zugeteilten Zeitschlitz gewartet werden muss. Aus Sicht einer industriellen Anwendung, die die Aktoren all ihrer Feldgeräte zur Gültigkeitszeit  $T_v$  stellen beziehungsweise die Messwerte ihrer Sensoren oder Geber zur Scan Time  $T_s$  erfassen will, muss dieser Umstand im Entwurf des Gesamtsystems berücksichtigt werden.

Im Gegensatz zu Zeitmultiplex können mit Frequenzmultiplex parallele, kontinuierliche physikalische Mehrpunktverbindungen realisiert werden. Das zugehörige Medienzugriffsschema ist FDMA. Ähnlich wie bei TDMA werden synchrone Netze vorausgesetzt, was im Falle von Frequenzmultiplex insbesondere die Frequenzsynchronisation betrifft. Ist jedem Funkteilnehmer sein Frequenzband signalisiert, so kann er diese zugeteilte Frequenzressource exklusiv nutzen. Während im klassischen Falle von TDMA einem Funkteilnehmer in seinem Zeitschlitz die gesamte Systembandbreite  $B_{sys}$  zur Verfügung steht, erhalten alle Funkteilnehmer bei FDMA nur einen bestimmten Anteil der Systembandbreite, den sie dafür kontinuierlich nutzen können. Diese Form der Mediennutzung ist daher gut geeignet für industrielle Anwendungen. Der Nachteil dieser Ausführungsform des Medienzugriffs besteht in der Komplexität des Funk-Controllers. Während die Funk-Slaves als einfache, schmalbandige Funkkomponenten ausgeführt sein können, muss der Funk-Master für jeden Funk-Slave eine Gegenstelle bieten. Dies erfordert die Ansteuerung und Kontrolle einer Vielzahl von Transceivern, die mit der Anzahl  $N$  der Feldgeräte einer Anwendung skalieren würde.

Bekanntester Vertreter für die Anwendung von Codemultiplex ist der Mobilfunkstandard UMTS, der seinen Medienzugriff mittels Code Division Multiplex Access (CDMA) organisiert. Hier operieren die Funkteilnehmer auf der gleichen Zeit- und Frequenzressource, während ihnen eine Spreizsequenz als exklusive Ressource zur Übertragung zugeteilt wird. Mittels dieser Ressource kann ein Funkteilnehmer das an ihn adressierte und entsprechend gespreizte Signal aus dem durch andere Funkteilnehmer überlagerten Gesamtsignal herauskorrelieren. Der Nachteil von CDMA liegt im sogenannten Near-Far-Problem. Eben jenes umschreibt, dass ein Funkempfänger Schwierigkeiten haben wird, das schwache Nutzsignal eines weit entfernten Funkteilnehmers aus einem Gesamtsignal herauszukorrelieren, wenn ein anderer, näher positionierter Funkteilnehmer, ein starkes Störsignal sendet und somit das Gesamtsignal beherrscht. Zwar gibt es Maßnahmen, wie die Regelung und Nachführung der Sendesignalpegel

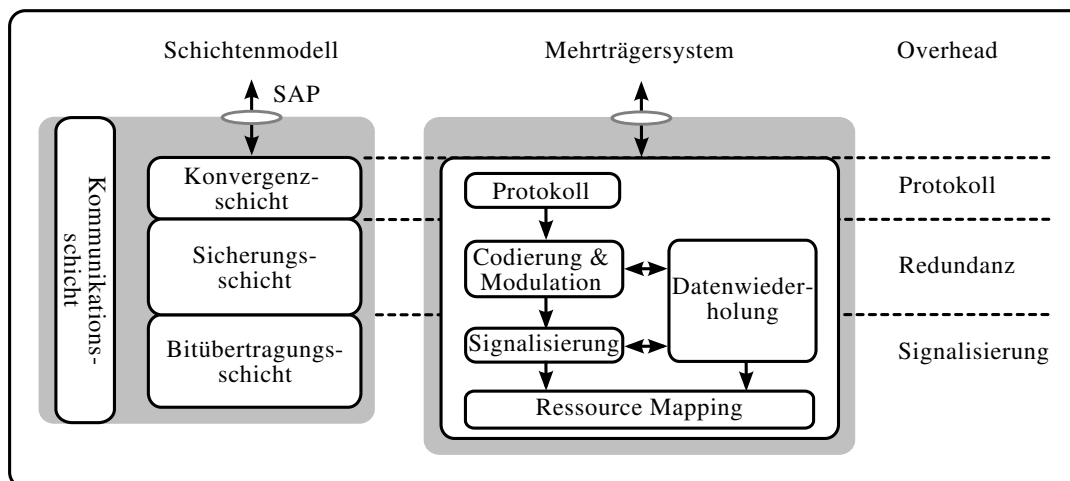


Abbildung 7.7.: Mehrträgersystem im industriellen Schichtenmodell der Feldebene.

Automatic Gain Control (AGC) oder die sukzessive Interferenzunterdrückung, bei der starke Störsignale zuerst detektiert und dann sukzessive vom Gesamtsignal abgezogen werden. Der Preis für die einhergehende Komplexität des Systems ist aber hoch.

Eine flexible und weit verbreitete Lösung ist die Kombination von Zeit- und Frequenzmultiplex, insbesondere im Zusammenspiel mit Mehrträgersystemen. Das Mehrträgersystemverfahren OFDM kommt beispielsweise bei IEEE 802.11n zum Einsatz. Dort wird jedem Funkteilnehmer die komplette Systembandbreite  $B_{sys}$  für die Übertragung zur Verfügung gestellt. Dabei wird die Systembandbreite bei Mehrträgersystemen von  $N_{sub}$  Unterträgern aufgespannt. Das Mobilfunkverfahren LTE macht sich diese Unterteilung der Systembandbreite im Frequenzbereich zu nutze, indem es Funkteilnehmern eine bestimmte Zeit-Frequenz-Ressource zuteilt. Diese Ressource setzt sich aus einer Zeitspanne und einer Menge von Unterträgern zusammen. Das zugehörige Verfahren in LTE-Downlink wird als OFDMA bezeichnet. Im Vergleich zu Funkkomponenten mit schmalbandigen Transceivern, wie beispielsweise bei FDMA, erfordern Mehrträgersysteme breitbandige und damit energiehungrige Transceiver, sowie eine kostenintensive Signalverarbeitung im Basisband. Ferner stellt der MAC-Scheduler die Schlüsselkomponente eines OFDMA-Systems dar, da diese Komponente des Funk-Masters die Ressourcenzuteilung für die Funkteilnehmer regelt. Andererseits bringt dieser Ansatz den großen Vorteil, Ressourcen adaptiv skalieren zu können, je nach Güte der Übertragung beziehungsweise der Anforderungen der einzelnen Funkteilnehmer.

#### 7.1.1.2.3. Umsetzung als Mehrträgersystem

Bereits im letzten Abschnitt wurde der konzertierte Einsatz von Zeit- und Frequenzmultiplex im Zuge eines deterministischen Medienzugriffs diskutiert. Die Umsetzung dieses Ansatzes wird im folgenden am Beispiel eines Mehrträgersystems tiefgreifender analysiert.

Abbildung 7.7 veranschaulicht das Modell eines Mehrträgersystems im Kontext des industriellen Schichtenmodells. Betrachtet man die Istwertübertragung einer industriellen Anwendung, so übergibt die Anwendung eines Feldgeräts dem Mehrträgersystem an seinem SAP Nutzdaten, also Istwerte, mit der Rate  $r_{x,n}$ . Die Kommunikationsschicht erhält demnach über ihren SAP

im Takt der Aktualisierungszeit  $T_{up}$  der Anwendung ein Datenpaket der Größe

$$L_{x,n} = r_{x,n} \cdot T_{up} . \quad (7.10)$$

Das Mehrträgersystem fügt diesen Nutzdaten einen anteiligen Protokolloverhead  $\alpha_{proto}$  seiner höheren Schichten – im industriellen Schichtenmodell entsprechend der Konvergenzschicht – hinzu. Nutzdaten und Overhead werden in der Sicherungsschicht mit Kanalkodierung der Rate  $r_c$  geschützt und über das Modulationsalphabet  $M_s$  auf Symbole abgebildet. Typischerweise werden die codierten Nutzdaten durch Rate Matching – beispielsweise Punktierung oder Padding – so in ihrer Größe angepasst, dass ganze Symbole verfügbar sind. Nach Modulation verbleiben somit  $L_{s,n}$  Datensymbole

$$L_{s,n} = L_{x,n} \cdot \frac{1 + \alpha_{proto}}{r_c \cdot \log_2(M_s)} . \quad (7.11)$$

Den Datensymbolen werden nun anteilig Signalisierungsdaten  $\alpha_{sig}$  hinzugefügt, bevor die Symbole in das Zeit-Frequenz-Schema des Mehrträgersystems abgebildet werden. Jede zuweisbare Einheit im Zeit-Frequenz-Schema des Mehrträgersystems wird als Ressource bezeichnet. Es werden demnach  $N_{s,n}$  Ressourcen benötigt, um die Daten- und Signalisierungssymbole eines Feldgerätes  $n$  aufzunehmen

$$N_{s,n} = L_{s,n} \cdot (1 + \alpha_{sig}) . \quad (7.12)$$

Abbildung 7.7 verdeutlicht dazu, dass die Sicherungsschicht auch die Steuerung von Datenwiederholungen übernimmt. Wie diese über einen Rückkanal indiziert werden, soll bei diesen Betrachtungen allerdings außer Acht gelassen werden. Der Fokus liegt vielmehr darauf, Ressourcen für den Falle von Datenwiederholungen zu berücksichtigen. Da Ressourcen für Datensymbole und deren Signalisierungsdaten vorgehalten werden, resultiert das in einer Anforderung nach  $N_{bl,n}$  Ressourcenblöcken im Zeit-Frequenz-Raster des Mehrträgersystems. Setzt man die vorherigen Gleichungen bis Gleichung (7.11) ineinander ein, so erhält man

$$\begin{aligned} N_{bl,n} &= N_{s,n} \cdot (1 + \alpha_{ret}) \\ &= L_{x,n} \cdot \frac{(1 + \alpha_{proto})}{r_c \cdot \log_2(M_s)} \cdot (1 + \alpha_{sig}) \cdot (1 + \alpha_{ret}) \\ &= L_{x,n} \cdot \underbrace{(1 + \alpha_{proto}) \cdot (1 + \alpha_{sig})}_{=: (1 + \alpha_{over})} \cdot \underbrace{\frac{(1 + \alpha_{ret})}{r_c \cdot \log_2(M_s)}}_{\text{Redundanz}} . \end{aligned} \quad (7.13)$$

Dabei wird Gleichung (7.13) so angeordnet, dass der letzte Term mit  $\alpha_{ret}$ ,  $r_c$  und  $M_s$  alle Einflussfaktoren der Redundanz beinhaltet, die maßgeblich die Robustheit der Übertragung bestimmen.

Darüber hinaus sind Protokoll- und Signalisierungsoverhead feste Parameter des Kommunikationssystems, die für alle Funkteilnehmer gleich sind. Die Redundanz hingegen ist ein Parameter, der in Abhängigkeit der Übertragungsgüte einer dedizierten Verbindung individuell für diese Verbindung eingestellt und dynamisch nachgeführt werden kann. In wie weit ein Kommunikationssystem diese Freiheitsgrade ausnutzt, hängt von dem Vorhandensein von Qualitätsparametern und der konkreten Ausführung von zugehörigen Regelungsschleifen ab, die sich selbst wiederum in dem Signalisierungsoverhead  $\alpha_{sig}$  der unteren Schichten von Bitübertragungs- sowie Sicherungsschicht niederschlagen. Für die weiteren analytischen

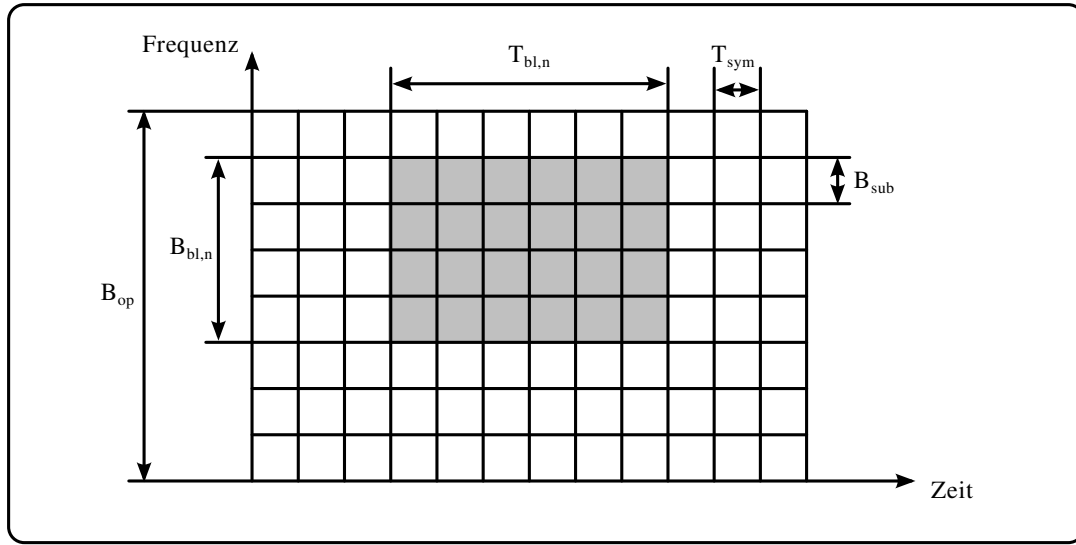


Abbildung 7.8.: Mapping von Symbolen in Zeit-Frequenz-Schema eines Mehrträgersystems.

Betrachtungen wird zur Abschätzung der unteren Grenze der Leistungsfähigkeit des Mehrträgersystems die vereinfachende Annahme getroffen, dass der Overhead durch Redundanz für alle Funkteilnehmer gleich ist. Diese vereinfachende Annahme schränkt keineswegs die zentrale Fragestellung für das Mehrträgersystem ein, ob und wie der Bedarf an Resourceblöcken  $N_{bl,n}$  für alle Funkteilnehmer  $n \in [1, N]$  geregelt werden kann. In der Praxis können gemäß Gleichung (7.13) sowohl eine individuelle Nutzdatenrate  $r_{x,n}$ , individueller Signalisierungs- $\alpha_{over}$ , oder auch individueller Redundanzoverhead zur Größe von  $N_{bl,n}$  beitragen.

Abbildung 7.8 veranschaulicht das Zeit-Frequenz-Schema eines Mehrträgersystems. Demnach steht effektiv die Bandbreite  $B_{op}$  zur Verfügung, die durch  $N_{sub}$  Unterträger mit dem Unterträgerabstand  $B_{sub}$  aufgespannt wird

$$B_{op} = B_{sub} \cdot N_{sub}. \quad (7.14)$$

Die Leistungsfähigkeit von Mehrträgersystemen wird im Kern durch die Orthogonalität der einzelnen Unterträger gewährleistet. Benachbarte Unterträger stören sich nicht, was durch die nutzbare Symboldauer  $1/B_{sub}$  erreicht wird [129]. Um im weiteren der Mehrwegeausbreitung vorzubeugen, wird jedem Symbol ein Schutzintervall der Länge  $T_{guard}$  vorangestellt, womit gemäß Gleichung (7.6) für die Symboldauer des OFDM-Symbols gilt

$$T_{sym} = \frac{1}{B_{sub}}(1 + \alpha_{guard}). \quad (7.15)$$

Die Einheit aus der Dauer  $T_{sym}$  und der Bandbreite  $B_{sub}$  ist folglich die kleinste adressierbare Ressource im Zeit-Frequenz-Schema des Mehrträgersystems.

Des weiteren zeigt Abbildung 7.8 beispielhaft, wie  $N_{bl,n}$  Ressourcen der Anwendung eines Feldgerätes  $n$  schematisch auf das Zeit-Frequenz-Schema des Mehrträgersystems abgebildet werden können. Im betrachteten Beispiel wird ein geschlossener Block mit  $N_{bl,n}$  Ressourcen für

Feldgerät  $n$  alloziert

$$N_{bl,n} = N_{T_{bl,n}} \cdot N_{B_{bl,n}} . \quad (7.16)$$

Daraus folgt für die Dauer  $T_{bl,n}$  und die Bandbreite  $B_{bl,n}$  der allozierten Ressource

$$T_{bl,n} = N_{T_{bl,n}} \cdot T_{sym} , \quad B_{bl,n} = N_{B_{bl,n}} \cdot B_{sub} . \quad (7.17)$$

Für das Zeit-Bandbreite-Produkt gilt nun

$$\begin{aligned} T_{bl,n} \cdot B_{bl,n} &= N_{T_{bl,n}} \cdot T_{sym} \cdot N_{B_{bl,n}} \cdot B_{sub} \\ &= N_{T_{bl,n}} \cdot N_{B_{bl,n}} \cdot T_{sym} \cdot B_{sub} \\ &= N_{bl,n} \cdot (1 + \alpha_{guard}) \cdot \frac{1}{B_{sub}} \cdot B_{sub} \\ &= N_{bl,n} \cdot (1 + \alpha_{guard}) , \end{aligned} \quad (7.18)$$

und unter Verwendung von Gleichung (7.13) schließlich

$$\begin{aligned} T_{bl,n} \cdot B_{bl,n} &= L_{x,n} \cdot (1 + \alpha_{over}) \cdot \frac{(1 + \alpha_{ret})}{r_c \cdot \log_2(M_s)} \cdot (1 + \alpha_{guard}) \\ &= L_{x,n} \cdot (1 + \alpha_{over}) \cdot (1 + \alpha_{ret}) \cdot \underbrace{\frac{(1 + \alpha_{guard})}{r_c \cdot \log_2(M_s)}}_{1/\eta_{mc}|_{N_{str}=1}} \\ &= L_{x,n} \cdot (1 + \alpha_{over}) \cdot (1 + \alpha_{ret}) \cdot \frac{1}{\eta_{mc}} . \end{aligned} \quad (7.19)$$

Mit Gleichung (7.19) lässt sich nun die Brücke zu den Anforderungen einer industriellen Anwendung hinsichtlich Systemkapazität und Echtzeitfähigkeit eines Kommunikationssystems schlagen. Soll jedes Feldgerät  $n$  seine Nutzdaten – in Form eines Datenpakets der Größe  $L_{x,n}$  pro Aktualisierungszeit  $T_{up}$  des Regelungsaktes – innerhalb der zeitlichen Schranke  $D_{x,n}$  der Übertragungslatenz übertragen, so muss für das Mehrträgersystem gelten

$$\sum_{n=1}^N T_{bl,n} \cdot B_{bl,n} < B_{op} \cdot D_{x,N} \quad (7.20)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (7.19) und weitere Umformungen erhält man

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N L_{x,n} \cdot (1 + \alpha_{over}) \cdot (1 + \alpha_{ret}) \cdot \frac{1}{\eta_{mc}} &< B_{op} \cdot D_{x,N} \\ \sum_{n=1}^N L_{x,n} \cdot (1 + \alpha_{over}) \cdot (1 + \alpha_{ret}) \cdot \frac{1}{\eta_{mc} \cdot B_{op}} &< D_{x,N} \\ (1 + \alpha_{over}) \cdot (1 + \alpha_{ret}) \cdot \frac{1}{R_{peak}} \cdot \sum_{n=1}^N L_{x,n} &< D_{x,N} . \end{aligned} \quad (7.21)$$

Mit der Annahme, dass die Nutzdaten der Feldgeräte und deren Datenpakete gleiche Größe

Tabelle 7.6.: Beispielhafte Systemparameter von Mehrträgersystemen.

Parameter	Charakteristik		Beschreibung
	LTE	IEEE 802.11n	
$B_{sys}$	20 MHz	20 MHz	Systembandbreite
$B_{op}$	18 MHz	16,25 MHz	Nutzbare Bandbreite
$N_{sub}$	1200	52	Anzahl an Unterträgern
$B_{sub}$	15 kHz	312,5 kHz	Abstand der Unterträger
$1/B_{sub}$	66,7 $\mu$ s	3,2 $\mu$ s	Symboldauer ohne Schutzintervall
$T_{guard}$	(4,69/5,21 $\mu$ s)	(0,8 $\mu$ s)	Länge des Schutzintervalls
$\alpha_{guard}$	$\approx 7,1\%$	25%	

$L_x = L_{x,n}$ ,  $\forall n \in [1, N]$  haben, gilt entsprechend

$$(1 + \alpha_{over}) \cdot (1 + \alpha_{ret}) \cdot \frac{N \cdot L_x}{R_{peak}} < D_{x,N}. \quad (7.22)$$

Die Gleichungen (7.21) beziehungsweise (7.22) stellen eine geschlossene Form dar, mit der sowohl die Anforderungen an die Systemkapazität als auch an die Echtzeitfähigkeit eines idealtypischen Mehrträgersystems ausgedrückt werden können. Auf dieser Basis kann mittels OFDMA ein deterministischer Medienzugriff ohne zufällige Wartezeiten umgesetzt werden.

Bevor die Leistungsfähigkeit des idealtypischen Mehrträgersystems bewertet wird, fasst Tabelle 7.6 die grundlegenden Systemparameter der beiden gängigsten, für die bidirektionale Kommunikation eingesetzten, Mehrträgersysteme zusammen. Das ist zum einen der Mobilfunkstandard der 4. Generation LTE, sowie der bereits eingehend im Bezug auf seine Leistungsfähigkeit untersuchte WLAN-Standard IEEE 801.11n. Beide Standards setzen unterschiedliche Medienzugriffsverfahren auf der Sicherungsschicht ein. Unterhalb dieser Sicherungsschicht kommt jedoch das gleiche Mehrträger-Übertragungsprinzip zum Einsatz, das auf OFDM basiert. Beide Systeme sind in der Lage, ihre Systembandbreite an die Anforderungen und Umgebungsbedingungen anzupassen. Hier wird zwecks der Vergleichbarkeit der Systeme eine einheitliche Systembandbreite von  $B_{sys} = 20$  MHz betrachtet.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Mehrträgersystemen ist die Anzahl  $N_{sub}$  und der Abstand  $B_{sub}$  der Unterträger. Während IEEE 802.11n mit 52 Unterträgern auskommt, spannt die Bitübertragungsschicht von LTE seine nutzbare Bandbreite  $B_{op}$  durch 1200 Unterträger auf, die im Abstand von  $B_{sub} = 15$  kHz angeordnet sind. Der Abstand  $B_{sub}$  der Unterträger repräsentiert einen wichtigen Freiheitsgrad beim Entwurf eines Mehrträgersystems, mit dem dem angedachten Einsatzbereich und den Anwendungsfällen Rechnung getragen werden kann. Während IEEE 802.11n in erster Linie für den Heimbereich unter stationären Bedingungen ausgelegt ist, müssen bei Mobilfunksystemen große Entfernungen bei hoher Mobilität berücksichtigt werden. Die Länge des Schutzintervalls  $T_{guard}$  bietet einen Freiheitsgrad, der für die Mehrwegeausbreitung in den gegebenen Einsatzbereichen als Entwurfparameter dimensioniert werden kann. Tabelle 7.6 zeigt entsprechend, dass die Länge des Schutzintervalls bei LTE mit  $T_{guard} \approx 5 \mu$ s in etwa sechsmal größer ist als bei IEEE 802.11n, was die Mehrwegeausbreitung durch Signalreflexionen an Gebäuden im Außenbereich



Tabelle 7.7.: Beispielparametrierung eines Mehrträgersystems für ausgewählte Übertragungscharakteristika.

Parameter	Übertragungscharakteristik			Beschreibung
	Ideal	Real	Schlecht	
$r_c$	3/4	1/2	1/2	Coderate
$M_s$	QPSK	QPSK	BPSK	Modulationsschema
$\eta _{N_{str}=1}$	1,5	1,0	0,5	spektrale Effizienz $\left[\frac{\text{bit}}{\text{s Hz}}\right]$
$R_{peak}$	25,1	16,7	8,4	Basis: LTE-Struktur [Mbps]
	19,5	13,0	6,5	Basis: IEEE-802.11n-Struktur [Mbps]

kompensiert. Tabelle 7.6 listet zwei Werte für die Länge des Schutzintervalls, was dem Fakt geschuldet ist, dass der Aufbau eines sogenannten Time Transmission Interval (TTI)-Rahmens sieben Mehrträgersymbole umfasst, wobei das erste Symbol ein Schutzintervall der Länge  $T_{guard} = 5,21 \mu\text{s}$ , alle weiteren Symbole innerhalb eines TTI ein Schutzintervall der Länge  $4,69 \mu\text{s}$  haben.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass LTE einen weiteren Modus mit zusätzlich verlängertem Schutzintervall bietet, der explizit für ländliche und bergige Gegenden gedacht ist. Dieser Fall wird im weiteren nicht betrachtet, da industrielle Anwendungen der Fertigungsautomatisierung in erster Linie Indoor-Anwendungen darstellen, die im Bezug auf die Mehrwegeausbreitung nicht an den Grenzbereich der Auslegung für Outdoor-Systeme wie LTE heranreichen können.

Mit der Dimensionierung des Schutzintervalls ist folglich auch die Größenordnung der Symboldauer  $T_{sym}$  eines Mehrträgersymbols bestimmt. Hier bleibt der Freiheitsgrad, welchen Anteil  $\alpha_{guard}$  das Schutzintervall vom Mehrträgersymbol einnimmt. Hier sieht man, dass LTE mit  $\alpha_{guard} \approx 7,1\%$  effizienter ausgelegt ist als IEEE 802.11n mit  $15\%$ . Die Symboldauer ohne Schutzintervall ist gemäß Gleichung (7.15) als die Inverse des Unterträgerabstands  $B_{sub}$  definiert. Diese Bedingung bildet gewissermaßen das Herzstück eines jeden OFDM-Systems, die es im Idealfall erlaubt, Mehrträgersymbole mittels Fast Fourier Transform (FFT) bei einer Abtastrate von  $B_{sub}$  ohne Interferenz zwischen den Unterträgern abzutasten und dadurch aufwendige Kompensationen einzusparen.

Im Falle von IEEE 802.11n nimmt ein Funkteilnehmer stets alle Unterträger  $N_{sub}$  und damit die gesamte nutzbare Bandbreite  $B_{op}$  in Anspruch, der Zugriff auf die Ressourcen wird über das CSMA/CA-Verfahren geregelt. Beim LTE-Downlink können Resourceblöcke per ofdma zugewiesen werden. Die minimale Größe einer Ressource umfasst 12 Unterträger und 14 Symbolauern (2 TTI), was einer Bandbreite von  $180 \text{ kHz}$  über eine Dauer von  $1 \text{ ms}$  entspricht. Insgesamt können damit bis zu  $N_{sub}/N_{sub}^{min} = 100$  physikalische Verbindungen zu unterschiedlichen Funkteilnehmern aufgebaut werden.

Die Leistungsfähigkeit des idealtypischen Mehrträgersystems wird nun anhand von Übertragungsprofilen bewertet. Dazu werden in Tabelle 7.7 drei Übertragungsprofile definiert und die entsprechenden, für die Redundanz relevanten Parameter ( $r_c$ ,  $M_s$ ,  $\eta$ ) des Mehrträgersystems für ideale, reale und schlechte Übertragungsbedingungen gesetzt. Tabelle 7.7 fasst die

einzelnen Parameter zusammen und gibt die resultierende Übertragungskapazität  $R_{peak}$  für alle Konfigurationen an.

Zusätzlich zu den Parametern in Tabelle 7.7 bildet die Anzahl von Paketwiederholungen  $\alpha_{ret}$  einen weiteren Bestandteil und Freiheitsgrad der Redundanz eines Funksystems, die im folgenden als abhängige Größe aus Gleichung (7.22) ermittelt wird. Dazu werden die Anforderungen industrieller Anwendungen zusammen mit der Systemkapazität  $R_{peak}$  und dem Protokolloverhead  $\alpha_{over}$  eines Mehrträgersystems für die definierten Übertragungsprofile (siehe Tabelle 7.6 und Tabelle 7.7) herangezogen. Formt man Gleichung (7.22) wie folgt um

$$\begin{aligned} (1 + \alpha_{ret}) \cdot (1 + \alpha_{over}) &< \frac{R_{peak}}{N \cdot L_x} \cdot D_{x,N} \\ 1 + \alpha_{ret} &< \frac{R_{peak}}{(1 + \alpha_{over})} \cdot \frac{D_{x,N}}{N \cdot L_x} \\ \alpha_{ret} &< \underbrace{\frac{R_{peak}}{(1 + \alpha_{over})}}_{\text{Kommunikation}} \cdot \underbrace{\frac{D_{x,N}}{N \cdot L_x}}_{\text{Anwendung}} - 1, \end{aligned} \quad (7.23)$$

kann mit  $\lfloor \alpha_{ret} \rfloor$  auf die maximale Anzahl von Paketwiederholungen geschlossen werden. Abbildung 7.9 veranschaulicht die Anzahl möglicher Paketwiederholungen  $\alpha_{ret}$  über der Übertragungscharakteristik des Funkkanals. Die Paketwiederholungen werden für jedes Übertragungsprofil bestimmt – zum einen in Abhängigkeit vom Anforderungsprofil der Anwendung und zum anderen in Abhängigkeit von den Charakteristika des Mehrträgersystems. Abbildung 7.9 bestätigt zunächst, dass eine auf LTE-Parametern basierende Mehrträgerstruktur effizienter ausgelegt ist. Das heißt bei gleichen Redundanzparametern – sprich bei gleicher Übertragungscharakteristik – erzielt man damit eine um  $\approx 20\%$  höhere Systemkapazität, womit nach Gleichung (7.23) auch entsprechend mehr Paketwiederholungen möglich sind.

Als weiteres Ergebnis liefert Abbildung 7.9, dass unabhängig von der Übertragungscharakteristik die Anforderungsprofile (a-1) und (b-1) genügend Marge liefern, Datenpakete zu wiederholen. Selbst bei robuster Übertragung für schlechte Übertragungsbedingungen gilt  $\alpha_{ret} > 25$ . Hingegen erfordert Profil (c-1) eine differenziertere Evaluierung. Für ideale und reale Übertragungscharakteristiken sind für die LTE-basierte Mehrträgerstruktur maximal  $\alpha_{ret} = 8$ , für die IEEE-802.11n-basierte Struktur noch bis zu 6 Paketwiederholungen realisierbar. Das Ergebnis dieser modellbasierten Analyse stimmt für die realen Übertragungsbedingungen gut mit den Heuristiken [39] [42] überein (siehe Abschnitt 7.1.1.1.1). Betreibt man eine industrielle Anwendung nach Profil (c-1) unter schlechten Übertragungsbedingungen, so bleibt Raum für 3, respektive 2 Paketwiederholungen, was in Abhängigkeit von der Art der zulässigen Übertragungsfehler eine vertretbare Lösung darstellt.

Zum Abschluss dieses Abschnitts kann man festhalten, dass sich ein idealtypisches Echtzeitfunksystem, beispielsweise in Ausführungsform eines Mehrträgersystems, hervorragend eignet, die Anforderungen industrieller Anwendungen zu erfüllen. Insbesondere können Mehrpunktverbindungen realisiert werden, die mit gängigen Funkstandards der IEEE-802.xx-Familie nicht ohne weiteres ausgeführt werden können. Die Grundstruktur der Bitübertragungsschicht von IEEE 802.11n kann hingegen als Basis eines Mehrträgersystem herangezogen werden, das mit geeignetem, deterministischem Medienzugriff ein idealtypisches Echtzeitfunksystem realisieren

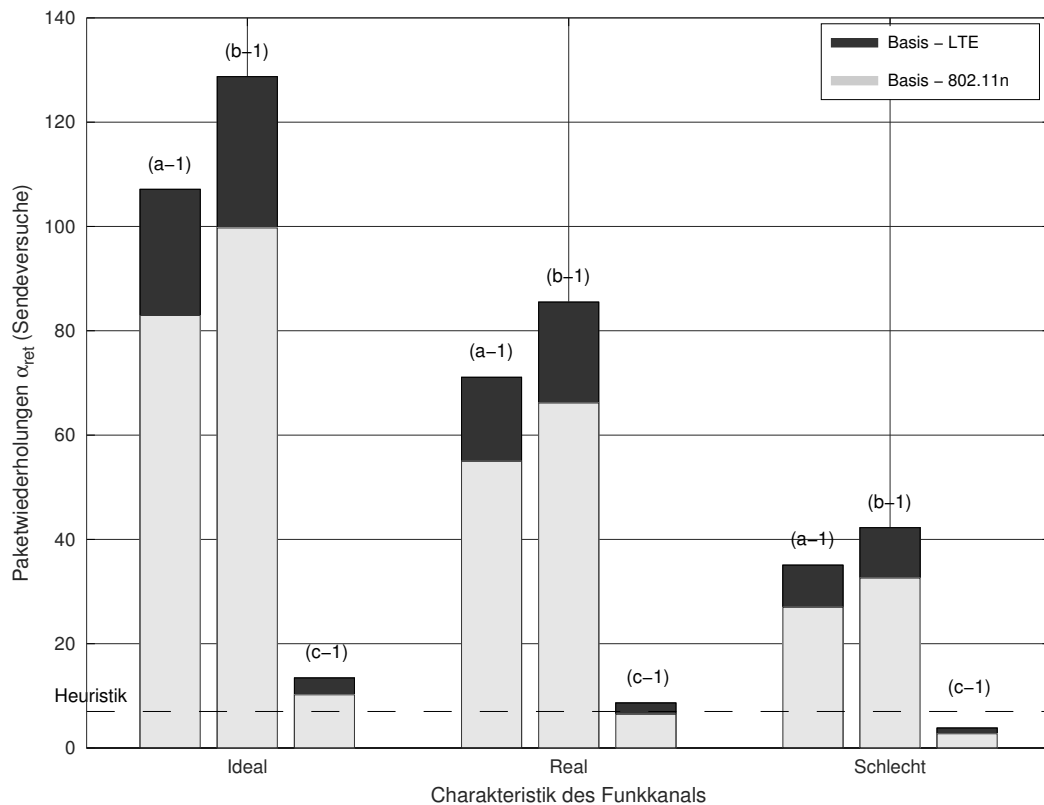


Abbildung 7.9.: Anzahl  $\alpha_{ret}$  möglicher Paketwiederholungen in Abhängigkeit von Übertragungscharakteristik, Mehrträgersystem und Anforderungsprofil.

kann.

Die Funkkomponente stellt im Kontext der gesamten Systemarchitektur eines hybriden industriellen Kommunikationssystems den ersten Bestandteil der Koppelkomponente dar. Gegenstand des folgenden Abschnitts 7.1.2 ist die Industrial-Ethernet-Komponente, die die Schnittstelle zur Anbindung von legacy Geräten bereitstellt.

### 7.1.2. Industrial Ethernet der Koppelkomponente

Der drahtgebundene Bestandteil der Koppelkomponente des hybriden industriellen Kommunikationssystems basiert auf Industrial Ethernet. Konkret wird im Rahmen dieser Arbeit sercos III betrachtet, das als Industrial-Ethernet-System vom Typ 3 auf industrielle Anwendungen mit isochronen Echtzeitanforderungen ausgelegt ist. Damit werden beispielsweise Motion-Anwendungen nach Anforderungsprofil (c-1) realisiert.

Im folgenden Abschnitt 7.1.2.1 werden die Leistungskennzahlen von sercos III zusammengefasst. In Abschnitt 7.1.2.2 werden diejenigen Kerneigenschaften des Industrial-Ethernet-Systems hervorgehoben, die für den Einsatz in einem hybriden Kommunikationssystem von Bedeutung sind.

Tabelle 7.8.: Leistungskennzahlen von sercos III [4].

Parameter	Auslegung des Systems			Beschreibung
	(a)	(b)	(c)	
$T_{cyc}$ [ms]	1	1	$31,25 \cdot 10^{-3}$	Zykluszeit ( $T_{cyc} = T_{up}$ )
$L_{x,n}$ [Bytes]	50	8	8	Paketgröße (Anwendung)
$N$	85/97	222/263	–/7	Knotenzahl (mit/ohne UCC)
$D_{BW}/D_{x,N}$	78 %	34 %	29 %	Effizienz (ohne UCC)

7.1.2.1. Leistungsfähigkeit von sercos III

In der Diskussion zur technischen Bestandsaufnahme wurde die grundlegende Funktionsweise von Industrial Ethernet am Beispiel von sercos III eingehend erörtert. Im folgenden wird die daraus resultierende Leistungsfähigkeit von sercos III betrachtet, wozu Tabelle 7.8 typische Leistungskennzahlen auflistet. Diesen Kennzahlen liegt die Annahme zugrunde, dass keine Übertragungsfehler auftreten. Die Annahme wiederum ist valide, sofern ein drahtgebundenes Kommunikationssystem derart installiert und in Betrieb genommen wird, sodass Einflüsse durch Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) verhindert oder zumindest vermindert werden. Neben der Übertragungssicherheit garantiert sercos III die Synchronität seiner Netzknoten mit einem Versatz  $\gamma < 1 \mu s$ . Die Bitübertragungsschicht von sercos III fusst auf Fast Ethernet mit einer Systemkapazität von  $R_{peak} = 100 \text{ Mbps}$ .

Basierend auf diesen Randbedingungen bietet sercos III die Möglichkeit, das Kommunikationssystem im Hinblick auf industrielle Anwendungen variabel zu konfigurieren. Tabelle 7.8 zeigt hierzu verschiedene Auslegungen des sercos-III-Systems für die Parameter Zykluszeit  $T_{cyc}$ , Paketgröße  $L_{x,n}$ , sowie der maximalen Knotenzahl  $N$ . Typischerweise wird bei sercos III die Periode der zyklischen Kommunikation mit der Periodendauer der Regelung auf Anwendungsschicht und der damit verbundenen Aktualisierungszeit der Anwendungsdaten gleichgesetzt  $T_{cyc} = T_{up}$ . Darüber hinaus sehen drahtgebundene Industrial-Ethernet-Systeme für die sporadische Kommunikation Bandbreite vor. Dies wird bei sercos III über den UCC realisiert, der in der Auflistung von Tabelle 7.8 mit einer Dauer von  $T_{ucc} = 125 \mu s$  berücksichtigt ist.

Betrachtet man die unterschiedlichen Auslegungen des Systems gemäß Tabelle 7.8, so können bei Konfiguration (a) für eine Zykluszeit von  $T_{cyc} = 1 \text{ ms}$  bei maximaler Datengröße  $L_{x,n} = 50 \text{ Bytes}$  ohne Verwendung des UCC bis zu  $N = 97$ , mit UCC noch 85 Netzknoten angebunden werden. Mit Konfiguration (b) können bei kleinen Datenmengen  $L_{x,n} = 8 \text{ Bytes}$  pro Netzknoten bis zu 222 beziehungsweise 263 Knoten vernetzt werden. Konfiguration (c) schließlich bietet für die minimale Zykluszeit  $T_{cyc} = 31,25 \mu s$  eine Datenmenge von 8 Bytes für 7 Netzknoten ohne UCC an.

Mit den Konfigurationen (a) und (b) aus Tabelle 7.8 deckt das Industrial-Ethernet-basierte sercos III alle im Rahmen dieser Arbeit formulierten Anforderungsprofile – insbesondere hinsichtlich Übertragungslatenz  $D_{x,N} < T_{cyc}$  und Systemkapazität  $L_{x,n} \cdot N/T_{cyc} < R_{peak}$  – seitens des drahtgebundenen industriellen Kommunikationssystems ab.

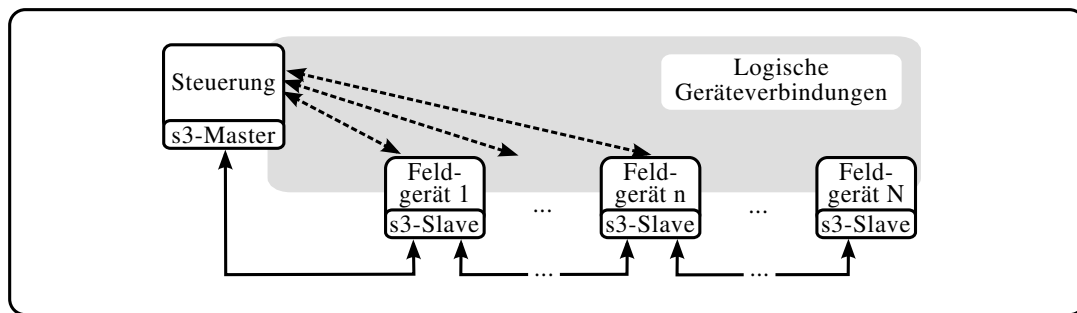


Abbildung 7.10.: Logische Geräteverbindungen einer Steuerung mit sercos-III-Master (s3-Master) zu Feldgeräten mit sercos-III-Slaves (s3-Slaves) bei Linientopologie.

### 7.1.2.2. Kerneigenschaften und Ausführungsformen

In diesem Abschnitt werden die Kerneigenschaften des sercos III hervorgehoben, die für die Integration in die Koppelkomponente des hybriden industriellen Kommunikationssystems von Bedeutung sind.

#### 7.1.2.2.1. Deterministischer Medienzugriff – Summenrahmenprotokoll

Das Industrial-Ethernet-System sercos III organisiert seinen Medienzugriff über das Summenrahmenprotokoll. Hierzu setzt der sercos-III-Master, der typischerweise in der Steuerung ausgeführt wird, den Kommunikationszyklus der zyklischen Kommunikation auf. Der Aufbau des sercos-III-Kommunikationszyklus beinhaltet sowohl das Timing als auch die Struktur von Datenpaketen auf dem Übertragungsmedium (siehe Abbildung 3.2).

Eine Kerneigenschaft des Summenrahmenprotokolls besteht darin, dass der sercos-III-Master alleinig den Zugriff auf die Kommunikationsressource regelt. Dies umfasst sowohl die Übertragung der Sollwerte zu den sercos-III-Slaves, als auch die der Istwerte von den Slaves. Pro sercos-III-System, und im weiteren Sinne auch pro Sub-System, kontrolliert stets ein Master den Medienzugriff aller Teilnehmer innerhalb des (Sub-)Systems und trägt dadurch Sorge dafür, dass der Medienzugriff mittels des Summenrahmenprotokolls deterministisch erfolgt.

Indem die sercos-III-Slaves typischerweise in den Feldgeräten ausgeführt werden, stellt sercos III durch sein Summenrahmenprotokoll und die Verbindung von sercos-III-Master und sercos-III-Slaves der Anwendungsschicht einer Steuerung unmittelbar logische Geräteverbindungen zur Verfügung. Diese logischen Verbindungen veranschaulicht Abbildung 7.10 schematisch am Beispiel einer Anwendung mit sercos III in Linientopologie. Tauschen nun die Steuerung und das Feldgerät  $N$  logisch ihre Anwendungsdaten – sprich Soll- und Istwerte –, so werden diese über die Datenpakete des sercos-III-Kommunikationszyklus und damit über alle sercos-III-Slaves der Feldgeräte 1 bis  $N - 1$  beziehungsweise umgekehrt weitergereicht.

#### 7.1.2.2.2. Effizienz der Datenpaketstruktur – Multi-Device-Frame

Neben der Deterministik des Summenrahmenprotokolls zeichnet sich sercos III durch die Effizienz seiner Datenübertragung aus. Entscheidend für diese Effizienz ist der Einsatz von Multi-Device-Frames. Ein vom sercos-III-Master generiertes Datenpaket stellt auf Ebene der Bitübertragungsschicht einen Ethernet-Frame nach IEEE 802.3 dar. Auf Ebene der

Datensicherungsschicht jedoch kann ein Frame die Daten unterschiedlicher Feldgeräte beinhalten. Der Aufbau eines Multi-Device-Frames sowie dessen Positionierung innerhalb des Kommunikationszyklus wird durch den sercos-III-Master festgelegt.

Jeder sercos-III-Slave liest und schreibt ausschließlich auf die ihm zugewiesenen Ressourcen innerhalb des Multi-Device-Frames, erstellt aber selbst keine eigenen Ethernet-Frames. Durch diesen Ansatz können Ethernet-Frames großer Größe erzeugt werden, was den Anteil des Signalisierungsoverheads reduziert. Der Preis für diesen Effizienzgewinn ist ein Verlust an Flexibilität. Der Aufbau des Kommunikationszyklus und damit auch die Struktur der Multi-Device-Frames werden bereits in einer Parametrierungs- und Konfigurationsphase erstellt. Erst nach Durchlaufen dieser Phasen wird in den operativen Betriebsmodus geschaltet, in dem die eigentliche Anwendung ausgeführt wird. Für industrielle Anlagen oder Maschinen ist diese Art der Inbetriebnahme unproblematisch.

Tabelle 7.8 stellt die Effizienzwerte der Datenübertragung für ausgewählte Systemkonfigurationen von sercos III dar. Es ist zu erkennen, dass die Effizienz der Übertragung stark von der Systemkonfiguration und dem konkreten Anwendungsfall – sprich Paketgröße, Zykluszeit und Knotenzahl – abhängt. So reicht die Spannweite der Effizienzwerte von 78 % für Konfiguration (a) bis zu 29 % für Konfiguration (c). Nachteilig wirken sich eine große Knotenzahl  $N > 100$ , eine kleine Zykluszeit ( $T_{cyc} < 1 \text{ ms}$ ) sowie geringe Datenmengen pro Knoten  $L_{x,n} < 10 \text{ Bytes}$  aus.

### 7.1.3. Konvergenzschicht der Koppelkomponente

Aufgabe der Konvergenzschicht der Koppelkomponente ist es, das drahtgebundene Industrial Ethernet mit der Funktechnologie einer Funkkomponente zu verbinden, sodass die Datenpakete einer industriellen Anwendung gemäß ihrer Anforderungen zwischen Steuerung und Feldgeräten über eine de-facto Industrial-Ethernet-Brücke und logische Geräteverbindungen übertragen werden können. Die dazu nötige Konvertierung von Übertragungsprotokollen ist die Kernaufgabe der Konvergenzschicht und wird in Abschnitt 7.1.3.2 ausgeführt.

#### 7.1.3.1. Industrial-Ethernet-Brücke

Aus Sicht einer industriellen Anwendung erscheint das Zusammenschalten zweier Koppelkomponenten eines hybriden industriellen Kommunikationssystems über deren Konvergenzschicht als eine Industrial-Ethernet-Brücke zwischen einer Steuerung und legacy Feldgeräten. Abbildung 7.11 veranschaulicht den Aufbau einer Industrial-Ethernet-Brücke zwischen einer Steuerung in Sub-System 1 und Feldgeräten beziehungsweise Feldgerätegruppen in den Sub-Systemen  $2 \dots N'$ .

Die Industrial-Ethernet-Brücke setzt sich aus dem Funksystem und dessen zugehörigen Funkkomponenten, der Konvergenzschicht sowie den Industrial-Ethernet-Komponenten zusammen. Die einzelnen Komponenten sind derart miteinander verschaltet, dass die Konvergenzschicht einer Koppelkomponente mit einem FM zu der Konvergenzschicht einer anderen Koppelkomponente mit einem FS zunächst eine Funkbrücke aufspannen. Des weiteren bindet die Konvergenzschicht einer Koppelkomponente die Industrial-Ethernet-Komponenten ein und realisiert damit das Entwurfsmuster eines Adapters zum drahtgebunden Kommunikationssystem. Die in Sub-System 1 der Steuerung integrierte Koppelkomponente führt ihre Industrial-Ethernet-

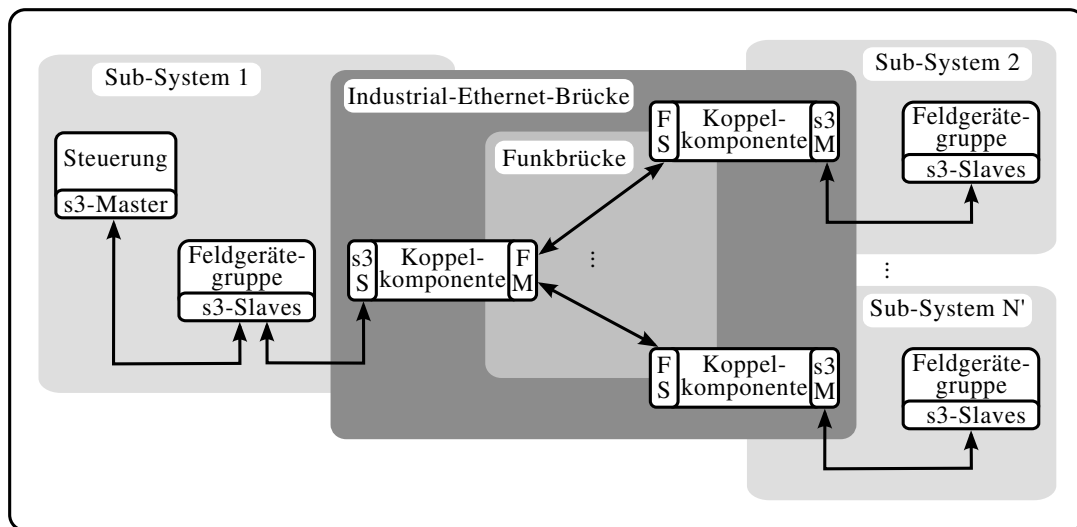


Abbildung 7.11.: Kopplung von Steuerung und Feldgerätegruppen über eine Industrial-Ethernet-Brücke basierend auf sercos III.

Komponente als Slave (sercos-3-Slave, s3S) aus, während die anderen Koppelkomponenten zur Ansteuerung der Feldgerätegruppen in den Sub-Systemen 2...N' einen Master (sercos-3-Master, s3M) integrieren.

### 7.1.3.2. Konvertierung der Protokolle

Neben dem Aufspannen einer Funkbrücke und dem Anbinden an das drahtgebundene Industrial-Ethernet-System übernimmt die Konvergenzschicht noch die Anpassung und Konvertierung der funkbasierten und drahtgebundenen Übertragungsprotokolle. Durch diese Anpassung erst wird die eigentliche Industrial-Ethernet-Brücke wirksam, auf der wiederum logische Geräteverbindungen von der Steuerung zu den Feldgeräten aufgebaut werden. Abbildung 7.12 stellt schematisch die Kopplung von Steuerung und Feldgeräten über eine Industrial-Ethernet-Brücke im industriellen Schichtenmodell dar. Für Steuerung als auch Feldgerät, die beide legacy Geräte des Systems darstellen, bleibt die Konvergenzschicht unbesetzt. Diese Geräte greifen über den SAP der Kommunikationsschicht auf die standardisierten Profile des Industrial-Ethernet-Systems zu (siehe Abbildung 2.3).

Lediglich die Koppelkomponenten selbst führen die Konvergenzschicht aus. Abbildung 7.12 veranschaulicht, wie die Koppelkomponenten zueinander verschaltet werden und an die legacy Geräte gekoppelt sind. Da eine Steuerung stets mit einem Industrial-Ethernet-Master (s3-Master) assoziiert wird, implementiert die der Steuerung zugewandte Koppelkomponente entsprechend einen Industrial-Ethernet-Slave (s3-Slave). Im Umkehrschluss wird in einem Feldgerät, wie einem Aktor oder Sensor, typischerweise ein Industrial-Ethernet-Slave ausgeführt, womit die den legacy Feldgeräten zugewandte Koppelkomponente zur Ansteuerung der Slaves einen Industrial-Ethernet-Master beinhaltet.

Prinzipiell stehen für industrielle Kommunikationssysteme mit der Kopplung auf Bitübertragungs- oder Sicherungsschicht zwei Anbindungskonzepte zur Verfügung, deren Eigenschaften, Vorteile und Nachteile in Abschnitt 6.3 diskutiert wurden. Im konkreten Falle ist für Industrial-

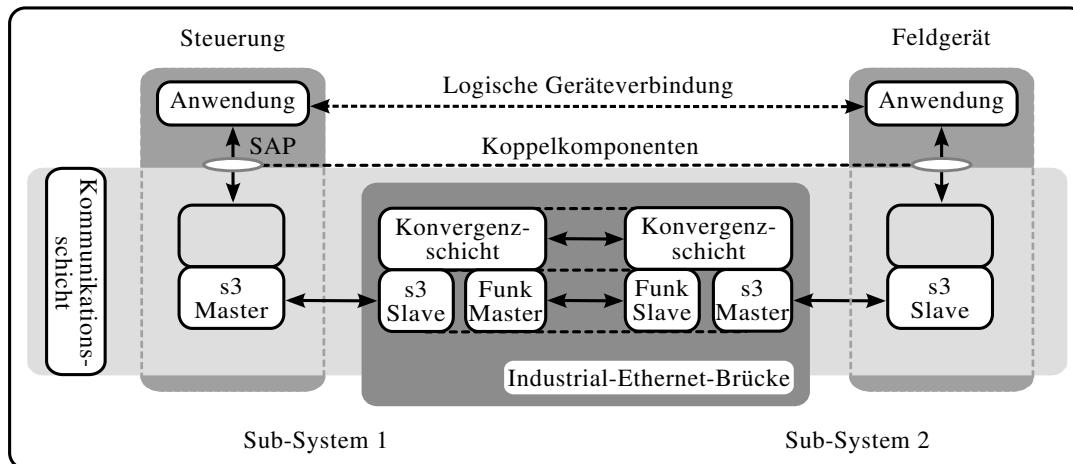


Abbildung 7.12.: Schichtenansicht für die Kopplung von Steuerung und Feldgerät über eine Industrial-Ethernet-Brücke basierend auf sercos III.

Ethernet-Systeme vom Typ 3, die wie sercos III das Summenrahmenprotokoll implementieren, die Kopplung auf Bitübertragungsschicht nicht umsetzbar, da die Eigenschaften der Bitübertragungsschicht in der Hochlaufphase des Systems messtechnisch erfasst werden, um als Parameter in die Auslegung des Protokolls, seiner zeitlichen Kenngrößen und seiner Paketstrukturen einzugehen.

Die Konvergenzschicht der in Abbildung 7.12 dargestellten Koppelkomponenten realisiert die Kopplung von Sub-System 1 und Sub-System 2 auf Sicherungsschicht. Ein Feldgerät in Sub-System 2 bezieht so seine Anwendungsdaten über die logische Geräteverbindung zur Steuerung in Sub-System 1. Die Anwendungsdaten werden diesem Feldgerät über das sercos-III-Summenrahmenprotokoll zugestellt. Dieses Summenrahmenprotokoll wird vom s3-Master der Koppelkomponente für alle s3-Slaves in Sub-System 2 aufgespannt. Die Konvergenzschicht alloziert Ressourcen und verteilt die Anwendungsdaten für das Summenrahmenprotokoll in Sub-System 2. Die Anwendungsdaten wiederum werden über die Funkbrücke aus Funk-Master und Funk-Slave zwischen beiden Sub-Systemen ausgetauscht. Auch hier übernimmt die Konvergenzschicht die Kontrolle über den Fluss der Daten.

In Sub-System 1 wird die der Steuerung zugewandte Koppelkomponente über ihren s3-Slave in das Summenrahmenprotokoll des s3-Masters der Steuerung eingebunden. Auch hier übernimmt die Konvergenzschicht die Aufgabe, Anwendungsdaten der Feldgeräte in Sub-System 2 zu akquirieren beziehungsweise zu transferieren. Das sercos-III-Summenrahmenprotokoll selbst terminiert im s3-Slave der Koppelkomponente. Die Konvergenzschicht kann die Anwendungsdaten aus dem Summenrahmenprotokoll auf mannigfaltige Art verarbeiten. Im einfachsten Falle kann der komplette Inhalt eines Multi-Device-Frames zur Übertragung über die Industrial-Ethernet-Brücke herangezogen werden. Hierzu werden in Abschnitt 7.2.3 optimierte Strategien zur Datenweiterleitung diskutiert.

Abschließend kann das Latenzmodell der Koppelkomponente nach Gleichung (5.12) für die Industrial-Ethernet-Brücke erweitert werden. Entsprechend gilt nun für die Übertragungslatenz



der Sollwerte

$$D_{c,N} = \underbrace{D_{c,N}^{s1}}_{\text{Gl.(5.2)}} + D_{Coup}^{s1 \rightarrow s2} + \underbrace{D_{c,N}^{s2}}_{\text{Gl.(5.10)}} + D_{Coup}^{s2 \rightarrow s3} + \underbrace{D_{c,N}^{s3}}_{\text{Gl.(5.2)}}, \quad (7.24)$$

mit den Verzögerungen  $D_{c,N}^{s1|s3}$  für das drahtgebundene Industrial-Ethernet-System in Sub-System 1 und Sub-System 2, der Verzögerung  $D_{c,N}^{s2}$  für das funkbasierte Systeme sowie den Verzögerungen  $D_{Coup}^{s1|s2 \rightarrow s2|s3}$  durch die Koppelkomponenten selbst.

## 7.2. Querschnittsfunktionen

Nach dem Systementwurf der Koppelkomponente werden im folgenden die Querschnittsfunktionen des hybriden industriellen Kommunikationssystems betrachtet, die nicht einer einzelnen Systemkomponente zugeordnet werden können. Zu diesem Zweck diskutiert Abschnitt 7.2.1 Aspekte des Engineerings eines hybriden industriellen Kommunikationssystems. Anschließend werden in Abschnitt 7.2.2 Verfahren zur Synchronisation der Systemkomponenten vorgestellt und bewertet. In Abschnitt 7.2.3 werden schließlich Strategien erörtert, wie die Leistungsfähigkeit des hybriden Kommunikationssystems optimiert werden kann.

### 7.2.1. Engineering des Kommunikationssystems

Unter dem *Engineering* eines industriellen Kommunikationssystems werden alle Aktivitäten zusammengefasst, die ein Nutzer einer industriellen Anwendung, sei es der Maschinenbauer, Installateur, Errichter oder Einsteller ausführen muss, um seine Anwendung in einen operativen Betriebsmodus zu überführen beziehungsweise darin zu halten. Hierzu zählen Arbeitsschritte wie die Projektierung, Kommissionierung, Konfiguration, Parametrierung, Inbetriebnahme, aber auch Aktivitäten wie Wartung, Entstörung oder Stilllegung.

#### 7.2.1.1. Konfiguration der Koppelkomponente

Zunächst ist für das Engineering des hybriden industriellen Kommunikationssystems die Konfiguration der Koppelkomponenten von Interesse. In Abschnitt 2.4.1 der Anforderungsanalyse wurde die Auslegung eines industriellen Kommunikationssystems der Feldebene als quasi-adaptiv charakterisiert (siehe Abschnitt 2.4.1). Gemeint ist damit, dass wichtige Kenngrößen einer Anwendung wie die Anzahl der Feldgeräte  $N$ , der Datenratenbedarf  $r_{x,n}$  pro Netzknoten  $n$  sowie die Aktualisierungszeit  $T_{up}$  oder Übertragungslatenz  $D_{x,n}$  einer Anwendung bereits vorab bekannt sind. Diese Kenngrößen stellen im Rahmen des Engineerings des Kommunikationssystems die Grundlage für die Auslegung der zyklischen Kommunikation des operativen Betriebsmodus im Allgemeinen, oder im Falle von sercos III für die Auslegung des Summenrahmenprotokolls im Speziellen, dar.

Für ein hybrides Kommunikationssystem mit einer Industrial-Ethernet-Brücke zeichnet der s3-Master der Koppelkomponente für das Aufspannen des Summenrahmenprotokolls in Sub-System 2 verantwortlich. Um dies in geeigneter Weise ausführen zu können, muss die Koppelkomponente die gleichen Inbetriebnahmeschritte durchlaufen wie eine Steuerung. Zu diesem Zweck definiert das Industrial-Ethernet-System sercos III Kommunikationsphasen [5], über die das Kommunikationssystem schrittweise in den operativen Betriebsmodus hochgefahren wird, in dem schließlich die Anwendungsdaten in der zyklischen Kommunikation des

Summenrahmenprotokolls ausgetauscht werden.

Andererseits gelten für die Koppelkomponente in Sub-System 1 und ihren s3-Slave die gleichen Inbetriebnahmeregeln wie für alle legacy Feldgeräte und ihre sercos-III-Slaves. Darüber hinaus muss die Koppelkomponente in Sub-System 1 die über die Industrial-Ethernet-Brücke angebotenen Feldgeräte der weiteren Sub-Systeme logisch repräsentieren können, sodass die Steuerung beim Engineering – im Besonderen beim Aufbau des Summenrahmenprotokolls für Sub-System 1 – den Feldgeräten anderer Sub-Systeme Rechnung tragen kann und entsprechend Ressourcen in Protokoll und Paketstrukturen reserviert werden.

Neben der sercos-III-Komponente muss auch die Funkkomponente der Koppelkomponenten als Funk-Master oder -Slave konfiguriert werden. Hierzu wird die Funkkomponente der steuerungsseitigen Koppelkomponente in Sub-System 1 als Funk-Master konfiguriert, die Funkkomponenten der anderen Koppelkomponenten entsprechend als Funk-Slaves. Überdies bieten sich abhängig von der konkreten Funktechnologie weitere Parameter, die für das Funksystem konfiguriert werden können, wie beispielsweise die Anzahl von Paketwiederholungen, maximale Paketgrößen, Codierung und Modulationsschema. In den Anwendungsfällen der Fallstudien in Teil III werden diese Parametrierungen konkretisiert.

### 7.2.1.2. Strategien zur Inbetriebnahme

Für die Inbetriebnahme des hybriden Kommunikationssystems bieten sich prinzipiell zwei Vorgehensweisen an: Ausgehend von der zentralen Steuerung werden beim *Top-down*-Ansatz die Systemkomponenten und Sub-Systeme mit ihren weiteren Systemkomponenten schrittweise eingebunden. Beim *Bottom-up*-Ansatz hingegen werden zunächst die steuerungsfernen Sub-Systeme einzeln hochgefahren, bevor sie mit dem steuerungsseitigen Sub-System und der Steuerung zusammengeschaltet werden.

Beiden Ansätzen ist gemein, dass dem Maschinenbauer beziehungsweise dem Installateur einer industriellen Anwendung die Anforderungen seiner Anwendung vorab bekannt sind. Damit ist das Anforderungsprofil an das Kommunikationssystem, präziser an die zyklische Kommunikation im operativen Betriebsmodus, bestimmt. Die einzelnen Stufen des Inbetriebnahmeprozesses unterstützen den Installateur dabei, das Kommunikationssystem derart auszuliegen, sodass das Kommunikationssystem in den operativen Modus überführt werden kann. Im Rahmen dessen werden Plausibilitätsbetrachtungen, beispielsweise zur Allokation von Ressourcen oder zur Bestimmung von Latenzen, herangezogen, um die Machbarkeit zu verifizieren. In der Praxis erscheint *Bottom-up* als der bedeutsamere der beiden Ansätze, da er im Einklang mit der Vorgehensweise beim Bau einer komplexen Maschine steht. Dort werden zunächst kleinere Maschinenteile und ihre Funktionalitäten erstellt, bevor diese einzelnen Maschinen-Gewerke zu einer komplexeren Maschine zusammengefügt werden.

Die einzelnen Stufen der Inbetriebnahme nach dem Bottom-up-Ansatz werden in Abbildung 7.13 veranschaulicht. Als Beispiel dient eine Industrial-Ethernet-Brücke, die ein sercos-III-basiertes Sub-System 2 samt seiner Feldgerätegruppe an die Steuerung in Sub-System 1 anbindet. In *Stufe I* der Inbetriebnahme werden die Feldgeräte in Sub-System 2 durch die Koppelkomponente angebunden. Dazu baut der sercos-III-Master des Summenrahmenprotokolls zu den sercos-III-Slaves auf. Zur Dimensionierung des Protokolls muss der Koppelkomponente und dem sercos-III-Master die Parameter der Anwendung, zumindest die für die Feldgeräte

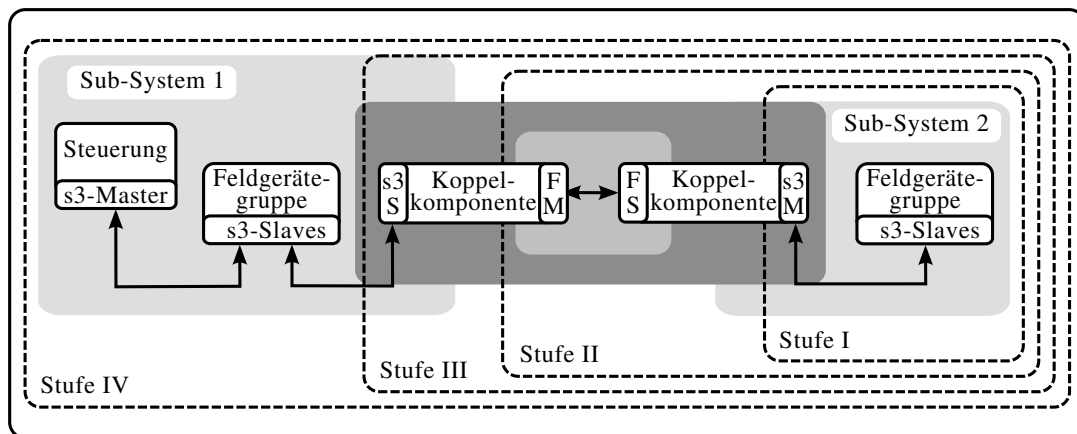


Abbildung 7.13.: Stufen zur Inbetriebnahme für Industrial-Ethernet-Brücke nach dem Bottom-up-Ansatz.

in Sub-System 2 relevanten Kenngrößen, mitgegeben werden. Ohne echte Anwendungsdaten auszutauschen steht mit Abschluss der Stufe I der von sercos III bereitgestellte, protokollseitige Rahmen der zyklische Kommunikation in Sub-System 2. Bei einer industriellen Anwendung mit mehreren Sub-Systemen ist diese Stufe I der Inbetriebnahme für jedes Sub-System zu durchlaufen.

In *Stufe II* wird die Funkbrücke zwischen den Koppelkomponenten in Betrieb genommen. Hier wird die Funkverbindung zwischen dem Funk-Master der Koppelkomponente in Sub-System 1 und dem Funk-Slave der anderen Koppelkomponente konfiguriert. Im Falle mehrerer Sub-Systeme werden entsprechend physikalische Mehrpunktverbindungen für den Funk-Master angelegt und je nach Funktechnologie zwischen expliziter Zuweisung oder impliziter Verteilung der Datenpakete vom Funk-Master zu den Funk-Slaves gewählt. Ebenso abhängig von der Funktechnologie wird in dieser Stufe die Konfiguration der Parameter der Sicherungs- und Bitübertragungsschicht des Funksystems vorgenommen.

Mit *Stufe III* wird die Industrial-Ethernet-Brücke geschlossen und dem steuerungsseitigen Sub-System 1 zur Kopplung angeboten. Die steuerungsseitige Koppelkomponente nimmt dazu die durch die Funkbrücke angebotenen Feldgeräte und Feldgerätegruppen der Sub-Systeme und repräsentiert diese als virtuelle Feldgeräte für Sub-System 1, sodass diese virtuellen Geräte bei der Inbetriebnahme von Sub-System 1 wie legacy Feldgeräte angebunden werden können. Diese Funktionsweise gleicht der gängiger Feldbuskoppler, die beispielsweise einfache Ein- und Ausgänge ohne explizite Busadressierung in ein Feldbussystem integrieren können.

In *Stufe IV* werden schließlich alle Feldgeräte des Sub-Systems 1 mit der Steuerung verbunden. Das schließt die durch die Industrial-Ethernet-Brücke angekoppelten und durch die steuerungsseitige Koppelkomponente virtuell repräsentierten Feldgeräte mit ein. Die Verarbeitungsschritte dieser Stufe sind sonst identisch mit denen der Stufe I zur Inbetriebnahme eines Sub-Systems. Mit dem Ende von Stufe IV ist die zyklische Kommunikation für Sub-System 1 der Anwendung voll funktionsfähig. Damit sind wiederum die logischen Geräteverbindungen zwischen der Steuerung und jedem Feldgerät des Gesamtsystems verfügbar und die industrielle Anwendung kann beginnen, Anwendungsdaten über ihr Kommunikationssystem austauschen.

## 7.2.2. Verfahren zur Synchronisation

Das Beschränken des zeitlichen Versatzes der Feldgeräte einer Anwendung zueinander – Synchronität – als auch das Einhalten äquidistanter Ausführungszeitpunkte eines Feldgerätes bezüglich der Kommunikationszyklen – Isochronität – sind essentielle Anforderungen an industrielle Kommunikationssysteme. Um diese Anforderungen zu gewährleisten, werden dedizierte Synchronisationsmechanismen eingesetzt, die typischerweise eine Querschnittsfunktion des industriellen Kommunikationssystems darstellen und sich folglich auf unterschiedliche Schichten und Komponenten des Systems verteilen.

Zu diesem Zweck werden in Abschnitt 7.2.2.1 existierende domänenspezifische Synchronisationsverfahren betrachtet. Ausgehend davon werden in Abschnitt 7.2.2.2 und Abschnitt 7.2.2.3 zwei Verfahren vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit für die Anforderungen nach *grober* und *feiner* Synchronisation entwickelt werden (siehe Abschnitt 5.4.2.3).

### 7.2.2.1. Vorbetrachtungen – Gängige Verfahren

In diesem Abschnitt werden die Wirkmechanismen gängiger Synchronisationsverfahren skizziert, die in der Netzwerk-Domäne, in drahtgebundenen Industrial-Ethernet-Systemen sowie in Funksystemen eingesetzt werden.

#### 7.2.2.1.1. Netzwerk-Domäne

Aus der Domäne der Netzwerktechnik sind das Network Time Protocol (NTP) [130] sowie der Standard IEEE 1588 [65] – besser bekannt unter dem Namen PTP – die gängigen Verfahren zur Synchronisation von Netzwerkknoten. Abbildung 7.14 veranschaulicht die grundlegende Funktionsweise beider Verfahren.

Zunächst basiert NTP auf dem Client- und Server-Prinzip, bei dem sich der Client auf die Zeitbasis eines Servers – oder die Zeitbasen mehrerer Server – synchronisiert. Gemäß Abbildung 7.14a sendet der Client periodisch einen *Request* als Unicast, der vom Server mit einer *Response* quittiert wird. Der Client erfasst den Zeitpunkt, zu dem er den Request sendet mit dem Zeitstempel  $T_{c1}$  und den Zeitpunkt  $T_{c2}$ , zu dem er die Response empfängt. Der Server wiederum erfasst den Zeitpunkt  $T_{s1}$ , zu dem er den Request des Clients empfängt und den Zeitpunkt ( $T_{s2}$ ), zu dem er seine Response sendet. Der Server übermittelt die Zeitstempel  $T_{s1}$  und  $T_{s2}$  als Payload seiner Response zum Client, sodass der Client die Umlaufzeit  $T_{rtd}$  zum einen

$$T_{rtd} = T_{c2} - T_{c1} - (T_{s2} - T_{s1}) \quad (7.25)$$

und den gerichteten Offset  $T_{off}$  zum anderen

$$T_{off} = \frac{T_{s1} - T_{c1} - (T_{c2} - T_{s2})}{2} \quad (7.26)$$

bestimmen kann. Durch weiterführende Signalverarbeitung der Messwerte  $T_{rtd}$  und  $T_{off}$  in Form von Filterungen und nachgelagerten Regelungsalgorithmen wird so die lokale Zeitbasis des Clients auf die Zeitbasis des Servers abgestimmt und nachgeführt.

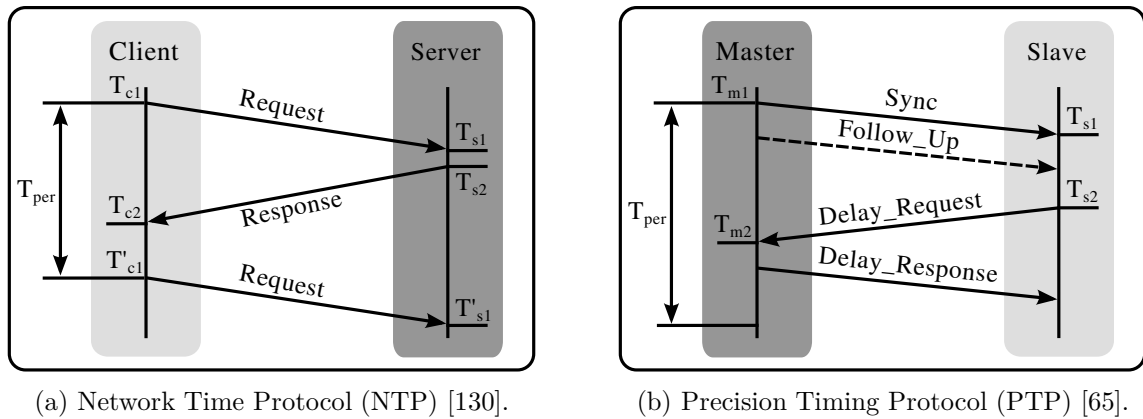


Abbildung 7.14.: Funktionsweise gängiger Protokolle zur Synchronisation von Netzwerken.

Im Gegensatz zum Client-Server-Prinzip bei NTP ist PTP als Master-Slave-Protokoll zu interpretieren, das Multicast-Fähigkeit im Netzwerk erfordert. Unter allen Uhren im Netzwerk wird nach dem Best Master Clock (BMC)-Algorithmus eine beste Uhr ermittelt, die als *Grandmaster Clock* bezeichnet wird – ihr zugehöriger Netzknoten als *Master*. Gemäß Abbildung 7.14b sendet der Master periodisch ein *Sync* als Multicast an alle Slaves des Netzwerks und erfasst diesen Zeitpunkt mit dem Zeitstempel  $T_{m1}$ . Ein Slave empfängt das *Sync* und erfasst diesen Zeitpunkt  $T_{s1}$ . Im Anschluss an das *Sync* sendet der Master ein *Follow-Up*, in das er den Zeitstempel  $T_{m1}$  des Sendzeitpunktes des *Sync* verpackt. Ein Slave antwortet mit einem *Delay-Request*, den er zum Zeitpunkt  $T_{s2}$  sendet, und den der Master zum Zeitpunkt  $T_{m2}$  empfängt. Der Master wiederum antwortet dem Slave per Unicast mit einem *Delay-Response*, der den Zeitstempel  $T_{m2}$  enthält. Dem Slave stehen nun alle vier Zeitstempel zur Verfügung und werden in vergleichbarer Weise wie bei NTP zum Abgleich der lokalen Zeitbasis mit der Grandmaster Clock verwendet.

Sowohl NTP als auch PTP beinhalten zahlreiche weitere Freiheitsgrade, die über die hier dargestellte grundlegende Funktionsweise hinausgehen, aber zur Bewertung der Güte der Synchronisation weniger bedeutsam sind. Im Wesentlichen hängt diese Güte von der Genauigkeit der Zeitstempel ab, die beim Austausch der Nachrichten nach Abbildung 7.14 erfasst werden. Hier bietet PTP den Vorteil, dass Zeitstempel, ob beim Senden oder Empfangen einer Nachricht, zunächst nur lokal aufgezeichnet werden. Bei NTP hingegen erfasst der Server den Zeitstempel  $T_{s2}$  für das Senden seiner *Response* und übermittelt diesen direkt als Nachrichtinhalt der *Response*, was je nach Ausführung einer Funkkomponente, dem zugehörigen Medienzugriffsschema, der Erfassung des Zeitstempels und der Einbettung des Zeitstempels in das Datenpaket zu größeren Ungenauigkeiten führen kann. In der Tat stellt dieser Zeitstempel eine spekulative Schätzung des Sendzeitpunkts dar. Bei PTP hingegen erfasst der Master den Zeitstempel  $T_{m1}$  genau dann, wenn das *Sync* tatsächlich gesendet wird. Der Zeitstempel wird im anschließenden *Follow-Up* übertragen.

Betrachtet man die Last, die beide Synchronisationsverfahren auf dem Kommunikationssystem verursachen, so kommt NTP mit zwei Nachrichten pro Sequenz aus, während bei PTP vier Nachrichten benötigt werden. Allerdings werden *Sync*-Nachrichten und *Follow-Ups* bei PTP als Multicast gesendet, womit sie insbesondere bei steigender Anzahl von Netzknoten relativ gese-

hen weniger zur Last beitragen. Die Last für das Kommunikationssystem wird vielmehr durch die Periode  $T_{per}$  bestimmt, mit der die Synchronisationssequenzen gefahren werden. Während eine geringe Periode  $T_{per}$  also die Last erhöht, trägt sie andererseits zur Steigerung der Güte der Synchronisation bei, da den Regelungsalgorithmen mehr Messwerte zugeführt werden können.

#### 7.2.2.1.2. Industrial-Ethernet-Systeme

Im Hinblick auf industrielle Kommunikationssysteme finden sich mit Ethernet-IP und Profinet IO zwei Vertreter Industrial-Ethernet-basierter Systeme, deren Synchronisationsverfahren auf PTP beruhen – beziehungsweise davon abgeleitet sind [131]. Darüber hinaus implementieren die vorrangig auf isochrone Echtzeitanforderungen ausgelegten Industrial-Ethernet-Systeme vom Typ 3 typischerweise proprietäre, auf ihr Systemverhalten zugeschnittene und optimierte Synchronisationsverfahren [132]. Folgendes sind typische Kennzeichen von Synchronisationsverfahren industrieller Kommunikationssysteme der Feldebene:

- Eine industrielle Anwendung benötigt in der Regel keine absolute Zeitbasis, um Regelungsaufgaben im Rahmen der zyklischen Kommunikation auf Feldebene auszuführen. Eine *relative Zeitbasis* zwischen den Feldgeräten und der Steuerung ist daher ausreichend.
- Bei der *Inbetriebnahme* oder dem *Hochfahren* einer industriellen Anwendung werden alle Geräte einer industriellen Anwendung durch das Synchronisationsverfahren auf die gleiche relative Zeitbasis eingestellt.
- Im *operativen Betriebsmodus* einer industriellen Anwendung sorgt das Synchronisationsverfahren für ein kontinuierliches Nachführen der Zeitbasen aller Geräte.

Im Kern beruhen die proprietären Synchronisationsverfahren Industrial-Ethernet-basierter Systeme darauf, dass ein Netzknoten als Master der Synchronisation dient. Wie Abbildung 7.15a veranschaulicht, sendet der Master bei der Inbetriebnahme einer Anwendung zunächst per Broadcast – oder Multicast – eine Synchronisationsnachricht an alle angebundenen Feldgeräte, die die Slaves der Synchronisation darstellen. Jeder Slave erzeugt bei Empfang der Synchronisationsnachricht einen Zeitstempel seiner lokalen Zeitbasis. Da jedes Feldgerät zur Weiterleitung von Datenpaketen mindestens zwei Ethernet-Ports besitzt, und jede Nachricht, unabhängig von der konkreten Topologie, ein Feldgerät mehrfach passiert, erfasst jeder Slave mehrere Zeitstempel, die er an den Master berichtet. In der konkreten Ausführung in Abbildung 7.15a realisiert Slave  $N$  einen *Loopback*, das heißt das von Slave  $N - 1$  eingehende Datenpaket wird wieder an Slave  $N - 1$  zurückgespielt. Mit den Zeitstempeln der Slaves und dem Wissen um die konkrete Topologie des Industrial-Ethernet-Systems kann der Master so eine Logik implementieren, durch die er auf die Laufzeiten zu und die Verzögerungen zwischen den Slaves rückschließen kann. Der Master signalisiert schließlich jedem Slave einen individuellen Offset, sodass alle Netzknoten die gleiche relative Zeitbasis – und damit eine synchrone Zeitbasis für die Valid Time  $T_v$  und die Scan Time  $T_s$  einer Anwendung (siehe Abschnitt 5.4.2) – besitzen.

Die Ausführung der Logik des Masters als auch die Bestimmung und das Format der Übertragung von Zeitstempeln hängt von dem konkreten industriellen Kommunikationssystem ab. Ferner kann der Master der Synchronisation – wie bei sercos III – mit der Ausführung der Industrial-Ethernet-Masters übereinstimmen, oder – wie bei EtherCAT – durch den der zentralen Steuerung nächstgelegenen Industrial-Ethernet-Slave realisiert werden.

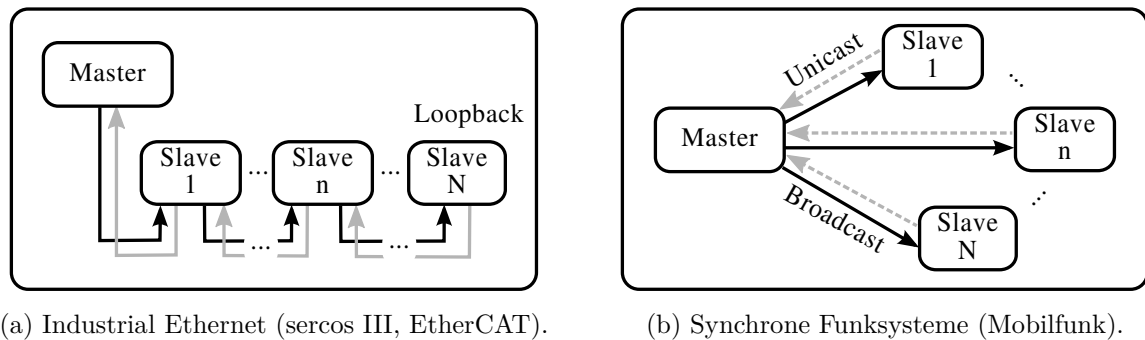


Abbildung 7.15.: Funktionsweise gängiger Synchronisationsverfahren bei Industrial Ethernet und bei Funksystemen.

Das Nachführen der Zeitbasis im operativen Betriebsmodus erfolgt typischerweise dadurch, dass der Master der Synchronisation kontinuierlich seine Zeitbasis an die Slaves übermittelt. Diese führen ihre lokalen Zeitbasen durch eine einfache Regelungsschleife als Phase Locked Loop (PLL) nach, um ein Abdriften von der bei der Inbetriebnahme eingestellten, initialen Zeitbasis zu verhindern.

### 7.2.2.1.3. Funksysteme

Bei Funksystemen findet eine Vielzahl unterschiedlicher Synchronisationsverfahren Verwendung, die an dieser Stelle nur ansatzweise skizziert werden können. Der Fokus liegt auf Verfahren, die für den Systementwurf des hybriden industriellen Kommunikationssystems relevant sind.

Bei asynchronen Funknetzen wie WLAN mit seinem Medienzugriffsverfahren CSMA/CA ist zuvorderst zwischen der Synchronisation beim Empfang eines Datenpakets und der Synchronisation von Funkteilnehmern untereinander zu differenzieren. Der erstere Fall umfasst die Paketdetektion, die Frequenzsynchronisation zum Einstellen der lokalen Oszillatoren sowie zur weiteren Zeitsynchronisation, sodass Datensymbole korrekt abgetastet und rekonstruiert werden können. Diese in IEEE-802.11-Standard generisch verankerten Verfahren beinhalten per se noch keine Synchronisation zwischen Funkteilnehmern. Dazu bietet IEEE 802.11 mit der Time Synchronization Function (TSF) ein zusätzliches Protokoll, das vorsieht, dass jeder Funkteilnehmer einen lokalen Timer der Genauigkeit  $1\mu\text{s}$  mitführt, den er anderen Funkteilnehmern über Broadcast-Nachrichten mitteilt und den die Funkteilnehmer nach Regeln der TSF-Spezifikation in die Aktualisierung ihres eigenen Timers einpflegen. Vergleichbar zu NTP und PTP basiert die TSF auf dem Austausch von Zeitstempeln, womit die Genauigkeit der Synchronisation auch bei TSF von der Generierung der Zeitstempel abhängt [133]. Darüber hinaus kann für WLAN anstelle der TSF auch das vom Übertragungsverfahren unabhängige PTP eingesetzt werden [133] [134]. Gemein ist allen Synchronisationsverfahren für asynchrone Netzwerke, dass die Protokolle auf Anwendungsschicht operieren.

Bei synchronen Netzwerken wie beispielsweise Mobilfunksystemen kommen Synchronisationsverfahren zum Einsatz, die den proprietären Verfahren Industrial-Ethernet-basierter Systeme ähneln. So ist in der Funkzelle eines Mobilfunksystems die Basisstation der Master der Synchronisation, der in einer Sterntopologie mit seinen Slaves – den Endgeräten – verbunden

ist. Ziel der Synchronisation ist es, alle Funkteilnehmer mit der gleichen relativen Zeitbasis zu versorgen, sodass eine zeitliche Interferenz insbesondere im Zeitmultiplex des Uplinks – der Datenübertragung von den Endgeräten zur Basisstation – verhindert wird. Abhängig vom jeweiligen Mobilfunkstandard existieren unterschiedliche Ausführungsformen, im Kern jedoch beruhen die Synchronisationsverfahren auf einem zweistufigen Ansatz.

Wie Abbildung 7.15b darstellt, sendet zunächst der Master periodisch eine Synchronisationssequenz als *Broadcast*. Jeder Slave der Funkzelle empfängt diesen Broadcast und bezieht seine lokale, relative Zeitbasis auf diesen Empfangszeitpunkt, indem die lokalen Oszillatoren eingestellt werden. Im weiteren Verlauf werden die Oszillatoren zur Kompensation des Drifts nachgeführt, wodurch die Endgeräte für den Downlink – die Datenübertragung vom Master zu den Slaves – synchronisiert sind. Zur Synchronisation des Uplinks wird eine Regelschleife zwischen dem Master und den Slaves aufgebaut. Dazu bestimmt der Master aus einer Datenübertragung der Slaves, die gemäß Abbildung 7.15b als *Unicast* ausgeführt wird, deren Empfangszeitpunkte. Der Master kann nun jedem Slave signalisieren, zu welchem Zeitpunkt er seine Uplink-Datenpakete im Rahmen seines Übertragungsrahmens senden soll, sodass sich Datenpakete der Slaves am Master nicht überlagern. Die Signalisierung besteht aus einem Offset, der auf die relative Zeitbasis zu beziehen ist. Um die Einflüsse durch Mobilität zu kompensieren, wird die Synchronisation des Uplinks kontinuierlich nachgeführt.

#### 7.2.2.1.4. Bewertung

Die Analyse in den vorangegangenen Abschnitten zeigt, dass es eine Vielzahl unterschiedlicher Konzepte und Herangehensweisen zur Synchronisation von Geräten, Netzknoten und Funkteilnehmern gibt, die vorrangig aus den Anforderungen von Anwendungen und Domänen resultieren, in denen die Kommunikationssysteme betrieben werden. Darüber hinaus besteht zwischen drahtgebundenen und funkbasierten Übertragungsverfahren der fundamentale Unterschied, dass physikalische Mehrpunktverbindungen von einem Funk-Master zu seinen Funk-Slaves als Sterntopologie ausgeführt werden, während drahtgebundene Industrial-Ethernet-Systeme diese Verbindungen als Ring- oder Linientopologie realisieren. Da die eingesetzten und diskutierten Synchronisationsverfahren mitunter diese Eigenschaften der Bitübertragungsschicht ausnutzen, ist das direkte Erweitern drahtgebundener Industrial-Ethernet-Systeme um Funkkomponenten hinsichtlich des Synchronisationsverfahrens nicht unmittelbar möglich.

Um die Kompatibilität zu legacy Geräten zu wahren, ist das Synchronisationsverfahren des jeweiligen Industrial-Ethernet-Systems als gegeben zu betrachten und bildet eine Randbedingung für die Synchronisation des Funksystems. Ferner ist ein Synchronisationsverfahren erstrebenswert, das unabhängig von der konkreten Funktechnologie realisiert werden kann. Zudem soll der Overhead möglichst gering ausfallen, da zusätzlicher Overhead durch explizite Signalisierung oder den Austausch von Zeitstempeln die Systemkapazität reduziert und damit Auswirkungen auf die Echtzeitfähigkeit des Kommunikationssystems nach sich zieht.

Als Ergebnis werden im folgenden zwei Synchronisationsverfahren entwickelt, die den gegebenen Randbedingungen Rechnung tragen. Sie eignen sich, drahtgebundene Sub-Systeme über einen Übertragungskanal zu synchronisieren, unabhängig von der konkreten Funktechnologie. Beide Verfahren basieren auf statistischer Signalverarbeitung und verzichten auf explizite Signalisierung, womit weder in das Funksystem noch in das Industrial-Ethernet-System selbst eingegriffen werden muss. Gemäß Klassifizierung eignet sich Verfahren I für *grobe synchronisier-*



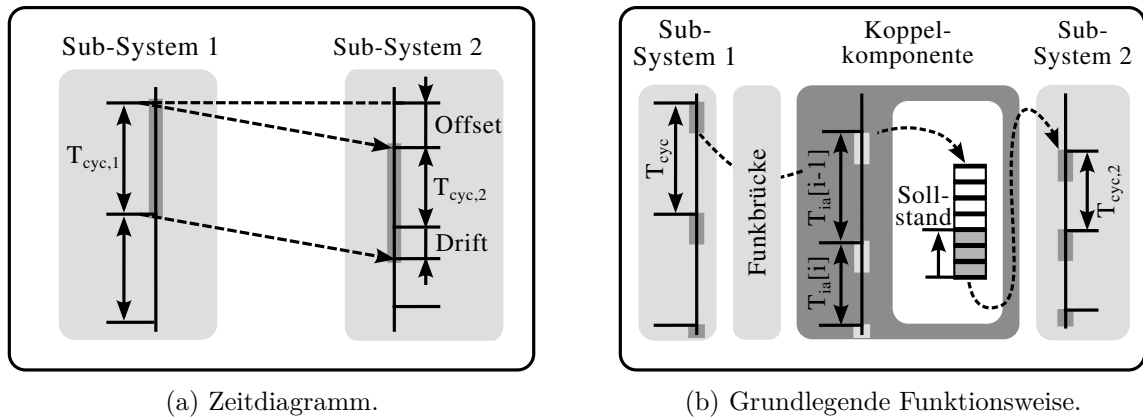


Abbildung 7.16.: Synchronisationsverfahren I für grob synchronisierte Sub-Systeme.

te Sub-Systeme und Verfahren II für *fein synchronisierte Sub-Systeme* (siehe Abschnitt 5.4.2.3). Beide Verfahren gründen auf dem Ansatz einer Industrial-Ethernet-Brücke, bei der das drahtgebundene Industrial-Ethernet-System eines jeden Sub-Systems durch einen Industrial-Ethernet-Master betrieben wird. Jedes Sub-System implementiert seinen eigenen Master der Synchronisation, der die Anforderungen an die Synchronisation der Feldgeräte innerhalb des Sub-Systems gewährleistet.

#### 7.2.2.2. Verfahren I – Grobe Synchronisation

Die grundlegende Funktionsweise von Synchronisationsverfahren I stellt Abbildung 7.16 dar. Die betrachtete Anwendung besteht aus zwei Sub-Systemen, wobei Sub-System 2 durch eine Funkbrücke an Sub-System 1 gekoppelt ist. Abbildung 7.16a veranschaulicht das Zeitdiagramm der zyklischen Kommunikation. Die Feldgeräte in Sub-System 1 – das auf Anwendungsschicht von der Steuerung und auf Kommunikationsschicht vom Industrial-Ethernet-Master getrieben wird – arbeiten auf Basis der Zykluszeit  $T_{cyc,1}$ , welche die Referenz-Zykluszeit der Steuerung der Anwendung repräsentiert  $T_{cyc} = T_{cyc,1}$ . Das über die Funkbrücke angekoppelte Sub-System 2 spannt durch seinen Industrial-Ethernet-Master eine eigene zyklische Kommunikation mit Zykluszeit  $T_{cyc,2}$  auf. Ohne Synchronisation sind die Kommunikationszyklen beider Sub-Systeme in der Ausgangssituation freilaufend. Das heißt, zum einen liegt gemäß Abbildung 7.16a ein *Offset* zwischen den Startzeitpunkten der Kommunikationszyklen, zum anderen führt der Versatz der freilaufenden Oszillatoren der Industrial-Ethernet-Master dazu, dass die Zykluszeiten beider Sub-Systeme unterschiedliche sind  $T_{cyc,1} \neq T_{cyc,2}$ . Dies führt zu einem *Drift* zwischen den Sub-Systemen über der Zeit.

Das Ziel von Verfahren I besteht darin, den Drift zwischen den Sub-Systemen auf die Größenordnung der Zykluszeit  $T_{cyc}$  zu begrenzen. Abbildung 7.16b veranschaulicht die grundlegende Funktionsweise von Verfahren I. Sie besteht darin, in der Konvergenzschicht der Koppelkomponente, die den Industrial-Ethernet-Master für Sub-System 2 betreibt, ein Empfangspuffer für die aus Sub-System 1 übertragenen Datenpakete aufzubauen. Der aktuelle Füllstand des Puffers liefert im Bezug auf einen definierten Sollstand die Stellgröße für die Regelung von  $T_{cyc,2}$ .

Die Grundidee von Verfahren I beruht darauf, dass Datenpakete periodisch mit der Zykluszeit

$T_{cyc}$  generiert und übertragen werden. Obwohl Datenpakete durch die steuerungsseitige Koppelkomponente in Sub-System 1 und durch die Funkbrücke verzögert werden, und obwohl sie zufälligen Wartezeiten bedingt durch das jeweilige Medienzugriffsverfahren des Funksystems unterliegen, kann dennoch ein Schätzwert  $\tilde{T}_{cyc}$  für die Zykluszeit in der Koppelkomponente von Sub-System bestimmt werden. Hierzu wird der Erwartungswert der Zwischenankunftszeit  $T_{ia}$  genutzt – beziehungsweise mangels Verfügbarkeit der Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $T_{ia}$  deren Mittelwert

$$\tilde{T}_{cyc} = \mu[T_{ia}]. \quad (7.27)$$

Dabei beschreibt die Zufallsgröße  $T_{ia}$  – beziehungsweise die Realisierung  $T_{ia}[i]$  von  $T_{ia}$  – die Zeitspanne vom Empfang eines Datenpakets in Kommunikationszyklus  $i - 1$  bis zum Empfang des nächsten Datenpakets in Kommunikationszyklus  $i$ .

Das Empfangspuffer aus Abbildung 7.16b füllt sich mit der Periode  $\tilde{T}_{cyc}$  mit den Datenpaketen von der Steuerung aus Sub-System 1. Zugleich werden mit der Periode  $T_{cyc,2}$  Datenpakete für die Zustellung an die Feldgeräte in Sub-System 2 über den Industrial-Ethernet-Master der Koppelkomponente aus dem Puffer entnommen. Die Regelung in der Koppelkomponente sorgt dafür, bei steigendem Pufferstand – für den  $T_{cyc,2} > T_{cyc}$  gilt – die Zykluszeit  $T_{cyc,2}$  zu verringern und bei sinkendem Pufferstand  $T_{cyc,2}$  entsprechend zu vergrößern. Für den Regelungsalgorithmus reicht es aus, den Pufferstand zu beobachten und gegen einen Sollstand abzugleichen. Die Zwischenankunftszeiten  $T_{ia}[i]$  selbst werden bei diesem Ansatz nicht benötigt.

Abbildung 7.17 veranschaulicht Messergebnisse für Verfahren I, die mittels des Demonstratorsystems aus Teil III bestimmt wurden. Gezeigt wird der zeitliche Verlauf des zeitlichen Versatzes  $\Delta_{sub}$  zweier Sub-Systeme für das Einschwingverhalten mit dem Übergang in den stationären Zustand. Der zeitliche Versatz wird dabei als relative Kenngröße bezogen auf die Zykluszeit dargestellt

$$\begin{aligned} \frac{\Delta_{sub}}{T_{cyc}} &= \frac{T_{cyc,2} - T_{cyc}}{T_{cyc}} \\ &= \frac{T_{cyc,2}}{T_{cyc}} - 1. \end{aligned} \quad (7.28)$$

Im Idealfall für  $T_{cyc,2} = T_{cyc}$  gilt  $\frac{\Delta_{sub}}{T_{cyc}} \rightarrow 0$ , für das auf grobe Synchronisation ausgelegte Verfahren I gilt entsprechend

$$|\Delta_{sub}| < \frac{T_{cyc}}{2}, \quad (7.29)$$

was für den stationären Zustand im rechten Abschnitt von Abbildung 7.17 zu erkennen ist. Sobald  $|\Delta_{sub}|$  wegen der Ablage der Oszillatoren den Grenzwert von  $\pm T_{cyc}/2$  wieder überschreitet, greift neuerlich der Regelungsalgorithmus von Verfahren I im Sinne von Gleichung (7.29). Vor dem stationären Zustand durchläuft die Koppelkomponente ihren Einschwingvorgang. Bei kleinerer Zykluszeit  $T_{cyc}$  wird der stationäre Zustand schneller erreicht, da der Regelung zum einen mehr Messwerte in der gleichen Zeit zur Verfügung stehen, zum anderen ein geringerer Regelweg zu bewältigen ist.

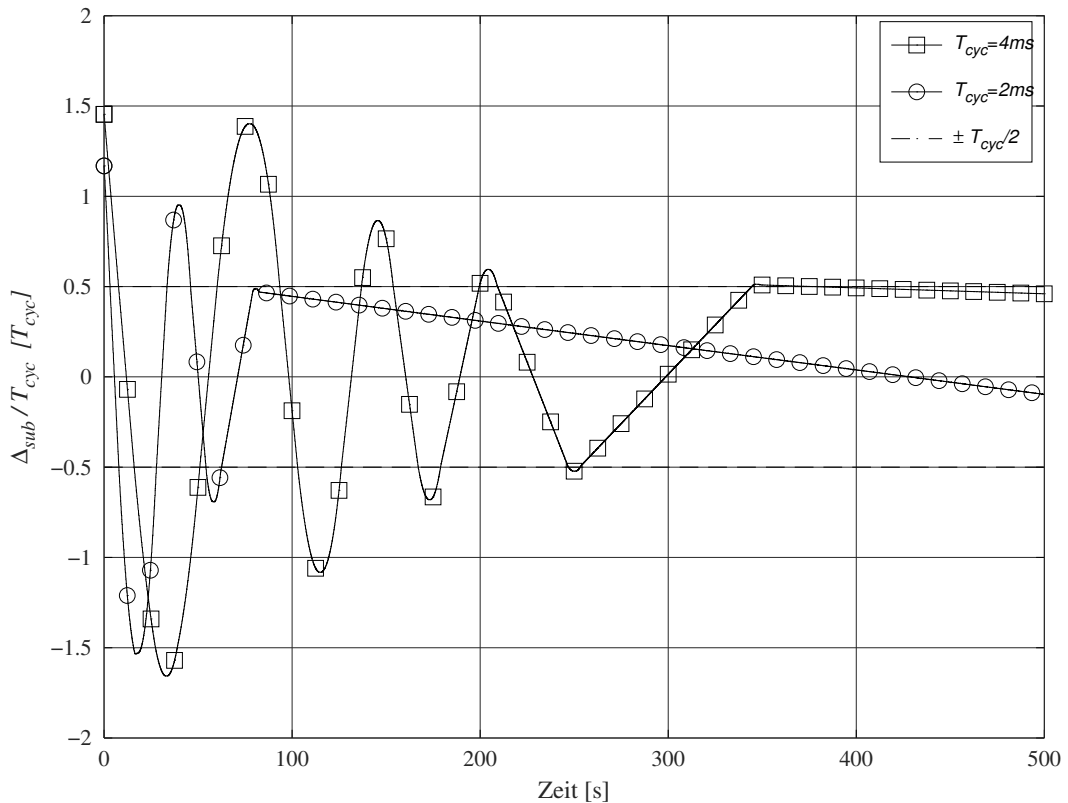


Abbildung 7.17.: Zeitverlauf des Versatzes zweier grob synchronisierter Sub-Systeme mit Verfahren I während des Einschaltvorgangs.

In Summe stellt Synchronisationsverfahren I einen Ansatz dar, der mit geringer Komplexität und wenig – im Hinblick auf Signalisierung auf dem Übertragungskanal gar komplett ohne – Overhead auskommt. Nach einer Einschwingphase ermöglicht das Verfahren, den Versatz zwischen Sub-Systemen auf die Größenordnung der Zykluszeit  $T_{cyc}$  zu begrenzen. Als Nachteil ist zu benennen, dass das Verfahren sensitiv gegenüber statistischen Ausreißern ist, beispielsweise verursacht durch Übertragungsfehler oder Datenpaketausfälle. Diese müssen gesondert kompensiert werden, beispielsweise durch Begrenzung, Filterung oder Eliminierung. Darüber hinaus durchläuft das Verfahren nach Initialisierung eine Einschwingphase, bis beide Sub-Systeme schließlich den Fangbereich des stationären Zustands erreicht haben. Letzterer Punkt ist aus Sicht einer industriellen Anwendung zeitlich gesehen unkritisch, da eine Maschine typischerweise im Dauerbetrieb arbeitet und nur bei Inbetriebnahme oder Wartung aus dem operativen Betriebsmodus genommen wird.

### 7.2.2.3. Verfahren II – Feine Synchronisation

In ähnlicher Weise wie Verfahren I beruht auch Synchronisationsverfahren II rein auf der Auswertung statistischer Kenngrößen. Bei Verfahren I wurde hierzu der Füllstand des Empfangspuffers der Koppelkomponente in Sub-System 2 ausgewertet. Das Verfahren beruht auf der Annahme, dass der Füllstand des Puffers ein Maß für den Drift zwischen den Zykluszeiten  $T_{cyc} = T_{cyc,1}$  und  $T_{cyc,2}$  der Sub-Systeme repräsentiert.

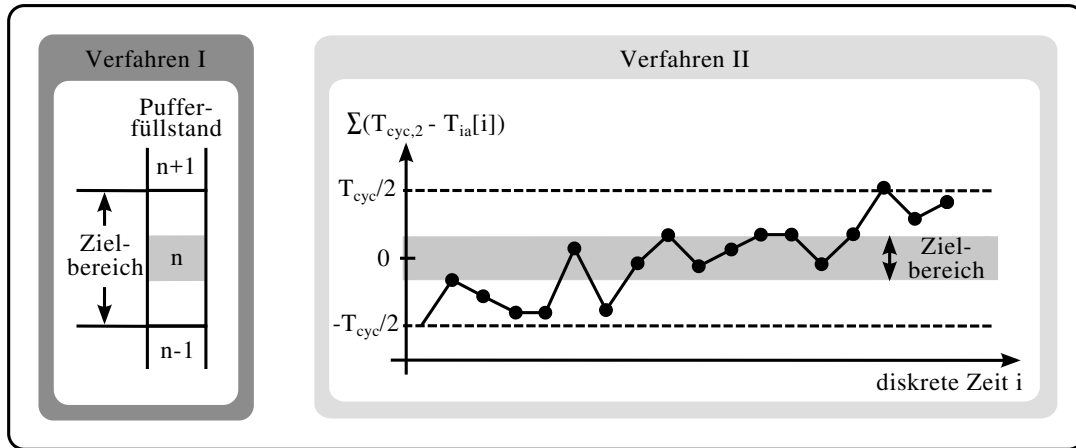


Abbildung 7.18.: Plausibilisierende Darstellung von Verfahren I und II zur groben und feinen Synchronisation.

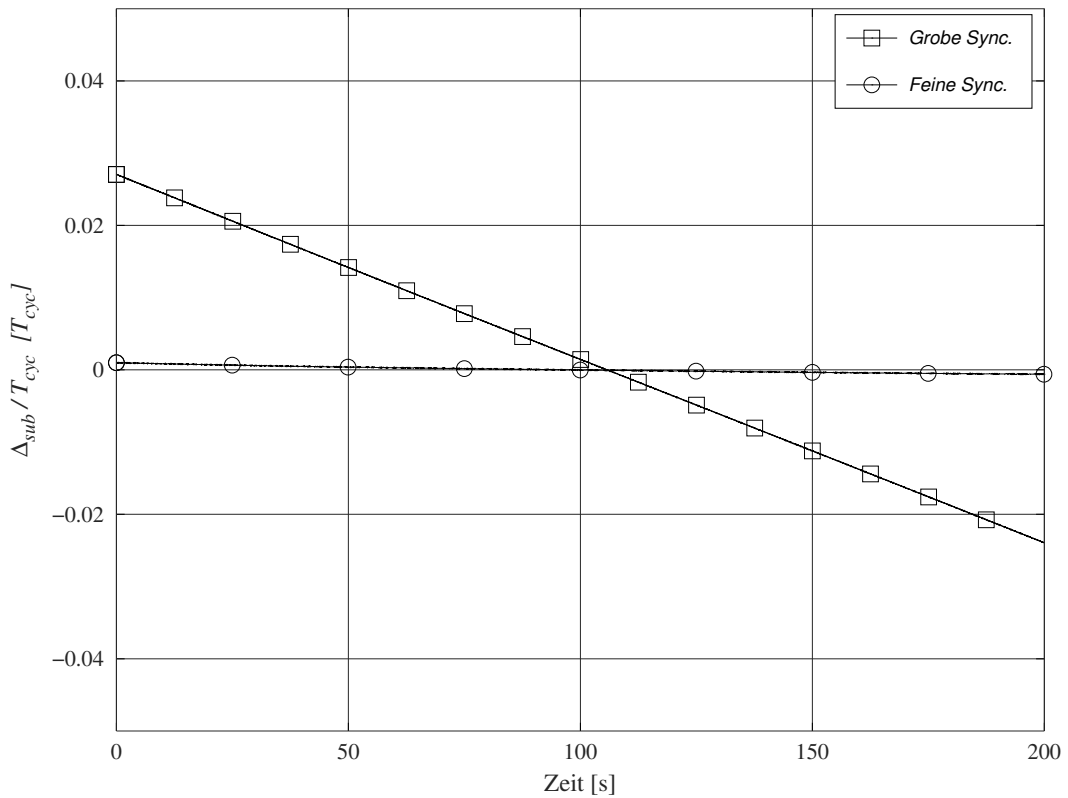
Nach Gleichung (7.27) kann die Zykluszeit  $T_{cyc}$  durch Messung der Empfangszeitpunkte von Datenpaketen in Sub-System 2 und die Bestimmung der Zwischenankunftszeit  $T_{ia}$  approximiert werden. Diese Betrachtung diente bereits zur Herleitung von Verfahren I, während  $T_{ia}$  selbst nicht im Algorithmus von Verfahren I genutzt wird. Demgegenüber macht Synchronisationsverfahren II Gebrauch von  $T_{ia}$ , um damit eine bessere Leistungsfähigkeit – sprich eine feinere Synchronisation zwischen Sub-Systemen – zu erzielen. Zur Plausibilisierung stellt Abbildung 7.18 die beiden Synchronisationsverfahren gegenüber. Verfahren I arbeitet auf dem Füllstand des Empfangspuffers. Sein Regelungsalgorithmus bekommt dann einen Impuls, wenn der Pufferfüllstand seinen Zielbereich verlässt, das heißt wenn gemäß Abbildung 7.18 nun  $n \pm 1$  anstelle von  $n$  Datenpaketen im Empfangspuffer detektiert werden. Im Bezug auf den Drift zwischen den Sub-Systemen hat das zur Folge, dass der Versatz der Oszillatoren und damit der Versatz der Zykluszeiten beider Sub-Systeme über der Zeit dazu führen, dass ein Sub-System einen kompletten Kommunikationszyklus verliert oder gewinnt. Genau dies ist auch die Größenordnung der Genauigkeit, die Verfahren I liefern kann.

Des weiteren veranschaulicht Abbildung 7.18 den zeitlichen Verlauf des Drifts zwischen zwei Sub-Systemen. Als Referenz zu Verfahren I ist dessen Zielbereich  $\pm T_{cyc}/2$  dargestellt. Für Verfahren II werden nun die Werte der Zwischenankunftszeit  $T_{ia}[i]$  eines jeden Kommunikationszyklus  $i$  zur genutzt, mit denen ein kleinerer Zielbereich und damit eine bessere Begrenzung des Drifts zwischen den Sub-Systemen realisiert werden kann. Als Eingangsgröße für ein PLL-basierte Regelung dient bei Verfahren II das Fehlersignal, das durch den Versatz  $\Delta_{sub}$  der beiden Sub-Systeme wie folgt beschrieben ist

$$\begin{aligned}\Delta_{sub} &= T_{cyc,2} - \tilde{T}_{cyc} \\ &= T_{cyc,2} - \mu[T_{ia}].\end{aligned}\tag{7.30}$$

Der Erwartungswert  $\mu[T_{ia}]$  wird als gleitender Mittelwert über den letzten  $N$  Messwerten von  $T_{ia}$  gebildet

$$\Delta_{sub}[i] \approx T_{cyc,2} - \frac{1}{N} \sum_{n=i}^{N-1+i} T_{ia}[n],\tag{7.31}$$



Abbildungung 7.19.: Zeitverlauf des Versatzes zweier Sub-Systemen bei grober und feiner Synchronisation im stationären Zustand.

was speichersparender ebenso als Infinite Impulse Response (IIR)-basierte Struktur umgesetzt werden kann. Der Versatz  $\Delta_{sub}[i]$  wird der PLL als eingehendes Fehlersignal aufgeprägt.

Die Messergebnisse zu Verfahren II liefert Abbildung 7.19. In Anlehnung an die Kurven aus Abbildung 7.17 zu Verfahren I wird der zeitliche Versatz  $\Delta_{sub}$  zweier Sub-Systeme normiert auf die Zykluszeit  $T_{cyc}$  dargestellt. Die Kurvenverläufe repräsentieren den Versatz als Messgröße im eingeschwungenen Zustand. Für Verfahren I zur groben Synchronisation ist ein kontinuierlicher Drift zu beobachten, der daher rührt, dass die PLL erst durch ein Überschreiten des Grenzbereiches  $\pm T_{cyc}/2$  mit einem neuen Fehlersignal gefüttert wird. Für den Bereich dazwischen kann gemäß des Kurvenverlaufs ein Versatz von  $\approx 1$  ppm gemessen werden. Im Gegensatz dazu kann mit Verfahren II im Sinne einer feinen Synchronisation der Versatz kontinuierlich nachgeführt werden, wodurch der Drift zwischen den Sub-Systemen kompensiert wird.

Im Ergebnis bietet sich Synchronisationsverfahren II ob seiner Leistungsfähigkeit an, bei Anwendungen mit isochronen Echtzeitanforderungen eingesetzt zu werden. Es besteht weiterhin der Vorteil, dass das Verfahren keine explizite Signalisierung benötigt, sondern auf den statistischen Kenngrößen der Empfangszeitpunkte von Datenpaketen beruht. Ähnlich wie bei Verfahren I wird dabei vorausgesetzt, dass eine industrielle Anwendung isochron Datenpakete generiert und diese Eigenschaft der Isochronität in der statistischen Betrachtung der Empfangszeitpunkte dieser Datenpakete, selbst über ein Funksystem, erhalten bleibt. Eben die Bestimmung des Empfangszeitpunktes ist eine entscheidende Herausforderung, die von der

konkreten Ausführung einer Koppelkomponente abhängt. Gängige Industrial-Ethernet-basierte Komponenten verfügen typischerweise über eine System-On-Chip-basierte Ausführungsform beziehungsweise einen hardwarenahen Programmierbaustein. Beide Ausstattungen ermöglichen eine unkomplizierte Ermittlung der Empfangszeitpunkte von Datenpaketen. Der Nachteil von Verfahren II besteht darin, dass durch die gleitende Mittelwertbildung eine gewisse Totzeit für die Regelung einhergeht. Für den initialen Einschwingvorgang ist das Verfahren daher schlicht ungeeignet. Als gute Lösung bietet sich eine Kombination der beiden vorgestellten Ansätze an. So wird Verfahren I für den initialen Einschwingphase verwendet, um die Zeitbasen der Sub-Systeme in den Fangbereich  $\pm T_{cyc}/2$  zu bringen. In diesem stationären Zustand wird Verfahren II zugeschaltet, das durch stetes Auswerten der Zwischenankunftszeit ein kontinuierliches Nachführen des Versatzes der Sub-Systeme ermöglicht.

### 7.2.3. Optimierung der Performance

Ein industrielles hybrides Kommunikationssystem bietet mit seiner Architektur, seinen Systemkomponenten sowie seiner Funktionsweise eine Vielzahl an Stellschrauben, die zur Optimierung des Gesamtsystems sowie einzelner Kenngrößen bedient werden können. Im folgenden werden daher wichtige Optimierungspotenziale aufgezeigt und bewertet.

#### 7.2.3.1. Organisatorische Maßnahmen

Zunächst werden organisatorische Maßnahmen zur Optimierung der Performance des hybriden Kommunikationssystems betrachtet.

##### 7.2.3.1.1. Funknetz – Planung und Regulierung

In erster Linie beziehen sich organisatorische Maßnahmen auf die Funkkomponente beziehungsweise die einzusetzende Funktechnologie. Haupttreiber hinter den Funk-bezogenen Maßnahmen ist schlichtweg, die begrenzte Ressource Funkbandbreite sparsam und bewusst zu nutzen. Wie in Abschnitt 6.1.2 beschrieben, sollte bei der Auslegung eines hybriden Kommunikationssystems bewusst entschieden werden, ob und an welcher Stelle Funktechnologie eingesetzt wird. Sofern eine Funktechnologie in den lizenzfreien ISM-Bändern operiert, sollte innerhalb der Fertigungsstandorte und Fabrikhallen eine Funknetzplanung für dieses Frequenzband durchgeführt werden. Dies zieht nach sich, vor der Installation einer industriellen Funklösung den Funkraum detailliert zu vermessen und diese Messungen kontinuierlich nachzuführen. Typischerweise sollten auch Richtlinien für den Gebrauch funkbasierter Consumer-Geräte für alle Mitarbeiter und Besucher ausgegeben werden, da diese Geräte in denselben lizenzfreien Bändern mit den funkbasierten industriellen Kommunikationssystemen interferieren können.

Eine weitere organisatorische Maßnahme der Automatisierungsbranche zielt dahin, die Herausforderungen der Koexistenz konkurrierender Funkteilnehmer in den lizenzfreien Frequenzbändern aufzulösen, indem ein dediziertes, exklusiv nutzbares Frequenzspektrum angestrebt wird. Eine Zuweisung durch die Regulierungsbehörden gestaltet sich bis dato allerdings mühsam (siehe Abschnitt 2.4.3).

##### 7.2.3.1.2. Antennentechnik – Robustere Funkübertragung

Im Zuge des Systementwurfs der Funkkomponente eines hybriden Kommunikationssystems wurden die gegensätzlichen Freiheitsgrade zur Steigerung der Robustheit einerseits und zur Minimierung der Übertragungslatenz andererseits erörtert und bewertet. Die technischen

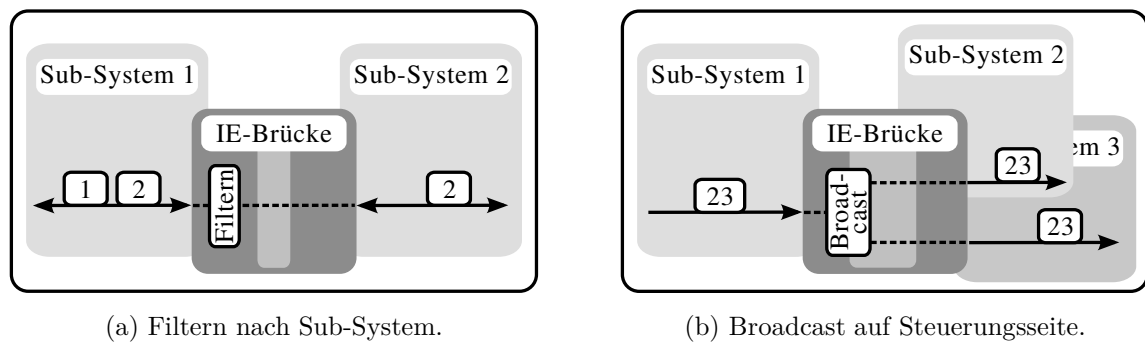


Abbildung 7.20.: Strategien zur Datenpaketformung von Multi-Device-Frames.

Stellschrauben umfassen insbesondere Paketwiederholungen sowie Modulations- und Codierungsschemata, die allesamt die spektrale Effizienz einer Funktechnologie definieren.

Unabhängig von der spektralen Effizienz kann die Robustheit der Übertragung für industrielle Anwendungsfälle durch weitere, eher organisatorische Maßnahmen optimiert werden. Die Motivation dafür gründet auf der Analyse von Mobilitätsanforderungen industrieller Anwendungen der Feldebene. Im Ergebnis lassen sich viele Anwendungen auf eine funkbasierte Sterntopologie zurückführen, die mit wenigen Funknetzknuten auskommt. Diese Funkkomponenten bewegen sich typischerweise nicht frei, sondern weisen feste Bewegungsmuster auf. Mit diesem Wissen kann eine zugeschnittene Antennentechnik eingesetzt werden, die beispielsweise den klassischen Rundstrahler zu Gunsten einer gerichteten Antennencharakteristik ersetzt. Je nachdem, wie reproduzierbar und wohldefiniert die Bahnen zwischen Funkkomponenten verlaufen, bieten sich auch Schlitzhohl- oder Leckleiter als Antennenvarianten an. Der Nachteil von zugeschnittenen Lösungen sind zum einen erhöhte Kosten, die über diejenigen einer Standardkomponente hinausgehen. Zum anderen ist mit Leistungseinbußen zu rechnen, sobald der vordefinierte Arbeitsbereich verlassen wird.

### 7.2.3.2. Technische Maßnahmen

Neben organisatorischen Maßnahmen listet dieser Abschnitt eine Reihe technischer Maßnahmen, mit denen die Performance des Kommunikationssystems optimiert werden kann. Ein wesentliches Charakteristikum bei der Übertragung von Datenpaketen zwischen einer Steuerung und Feldgeräten ist die Struktur des Multi-Device-Frames. Eine ganze Reihe potenzieller Optimierungen basiert auf seiner Struktur und dient primär der Lastreduktion auf der Funkstrecke zwischen den Sub-Systemen. Wie gezeigt, ist eine geringe Last auf dem Übertragungsmedium eine notwendige, wenn auch nicht eine hinreichende Bedingung für die Erfüllung von Echtzeitanforderungen einer industriellen Anwendung. Die im folgenden diskutierten Maßnahmen adressieren eben diese Lastreduktion für die Funkstrecke beginnend mit Strategien zur Datenpaketformung von Multi-Device-Frames, die mit Abbildung 7.20 veranschaulicht werden.

#### 7.2.3.2.1. Paketformung I – Sub-System angepasste Formung

Eine erste Maßnahme zur Lastreduzierung auf der Funkstrecke besteht darin, nur diejenigen Datenpakete per Funk zu übertragen, die in den angebundenen Sub-Systemen benötigt werden. Dazu stellt Abbildung 7.20a schematisch dar, wie in dem steuerungsseitigen Sub-System eine

Steuerung zwei Multi-Device-Frames in Form von Datenpaket 1 und 2 im Rahmen ihrer zyklischen Kommunikation über ihren Industrial-Ethernet-Master auf das Kommunikationssystem von Sub-System 1 aufprägt. Die Multi-Device-Frames sind derart aufgebaut, dass Datenpaket 1 die Nutzdaten der Feldgeräte aus Sub-System 1 beinhaltet, während Datenpaket 2 die Nutzdaten der Feldgeräte aus Sub-System 2 enthält. Über die Industrial-Ethernet-Brücke, und damit auch die Funkbrücke zwischen beiden Sub-Systemen wird nur Datenpaket 2 übertragen.

Für die Industrial-Ethernet-Brücke – zuvorderst für die steuerungsseitige Koppelkomponente – birgt es keine Schwierigkeit, nur die für das angebundene Sub-System relevanten Datenpakete herauszufiltern und über die Funkbrücke zu übertragen. Diese Aufgabe entspricht quasi einer Standardfunktionalität von Bridges. Die Herausforderung liegt vielmehr darin, dass für legacy Steuerungen und ihre Industrial-Ethernet-Master keine Regel existiert, Multi-Device-Frames und Datenpakete nach der Zugehörigkeit zu Sub-System zu gruppieren. Ist diese Gruppierung seitens der Steuerung nicht möglich, kann die Aufgabe von der steuerungsseitigen Koppelkomponente übernommen werden. Hierzu benötigt die Koppelkomponente allerdings Wissen, das ihr über einen Engineering-Prozessschritt bei der Inbetriebnahme mitgegeben werden muss. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass die Steuerung weiterhin als legacy Gerät betrieben werden kann. Nachteilig erweisen sich zum einen der erhöhte Aufwand für die Inbetriebnahme der Koppelkomponente, zum anderen der erhöhte Rechenaufwand der Koppelkomponente, die eingehende Datenpakete parsen und gegebenenfalls neu zusammenstellen muss. Des weiteren verletzt aus struktureller Sicht eine Koppelkomponente, die den Inhalt von Datenpaketen durchsucht und Logiken darauf anwendet, das Prinzip des Schichtenmodells.

#### 7.2.3.2.2. Paketformung II – Broadcast in mehrere Sub-Systeme

Eine weitere Lastreduktion für die Funkstrecke lässt sich durch den Einsatz von Broad- oder Multicast in der Übertragungsrichtung von der steuerungsseitigen Koppelkomponente zu den weiteren Sub-Systemen realisieren. In der Nomenklatur der Modellbildung wird damit eine implizite Paketverteilung für eine physikalische Mehrpunktverbindung realisiert.

Abbildung 7.20b veranschaulicht schematisch die Wirkweise des Ansatzes für eine Industrial-Ethernet-Brücke, die das steuerungsseitige Sub-System 1 mit zwei weiteren Sub-Systemen 2 und 3 verbindet. Enthält das Datenpaket 23 die Sollwerte aller Feldgeräte der Sub-Systeme 2 und 3, so kann das Datenpaket per Broadcast an die steuerungsfernen Koppelkomponenten der Sub-Systeme 2 und 3 übertragen werden. Je nach Anzahl  $N + 1$  der vorhandenen Sub-Systeme können mit dieser Maßnahme  $N - 1$  Datenübertragungen der Sollwerte eingespart werden. Darüber hinaus skizziert Abbildung 7.20b, dass die Datenpakete in den steuerungsfernen Sub-Systemen nun auch die Nutzdaten anderer Sub-Systeme mitführen. Genauer beinhaltet das Datenpaket für Sub-System 2 auch die Sollwerte der Feldgeräte aus Sub-System 3. Als Gegenmaßnahme hierzu kann eine Datenfilterung in der steuerungsfernen Koppelkomponente implementiert werden, die ihrer zyklischen Kommunikation nur die ihrem Sub-System zugeordneten Nutzdaten aufprägt.

Wie in Abschnitt 7.2.3.2.1 diskutiert ist ein entsprechender Aufbau des Multi-Device-Frames Voraussetzung, um den Broadcast-Ansatz umzusetzen. Bietet eine legacy-Steuerung diese Voraussetzung nicht, kann die Datenformung mit Mehraufwand in der steuerungsseitigen Koppelkomponente realisiert werden. Ferner dient die maximale Größe eines Datenpakets als obere Grenze für die Wirksamkeit des Ansatzes. Diese Größe ist durch die jeweilige



Funktechnologie bestimmt. Zwar können mittels Datensegmentierung große Datenpakete in eine Menge kleinerer Pakete zerstückelt werden. Dadurch wird allerdings der angestrebte Mehrwert der Maßnahme unwirksam.

Ein wesentlicher Nachteil der Datenübertragung per Broadcast ist das fehlende ACK. Dieses kann auf Anwendungsebene im Zuge der Istwertübertragung nachgeliefert werden. Aus dem Blickwinkel der Latenz der Regelschleife ist dieser Ansatz nicht sinnvoll umsetzbar. Für die Istwert-Übertragung kommt ein Unicast zum Einsatz, der die Übertragung der Istwert von den Feldgeräten eines steuerungsfernen Sub-Systems zur Steuerung übernimmt. Der Unicast wird als explizite Paketzweisung einer physikalischen Einzelpunktverbindung zwischen den Funkkomponenten zweier Sub-Systeme ausgeführt.

#### 7.2.3.2.3. Paketabweisung – Präventives Verwerfen von Datenpaketen

Gemäß den Echtzeitanforderungen industrieller Anwendungen müssen Nutzdaten innerhalb vorgegebener zeitlicher Schranken übertragen werden. Treffen Datenpakete samt ihrer Nutzdaten verspätet an der Datensenke ein, so können die Nutzdaten von der Anwendung nicht mehr verwendet werden; sie werden verworfen. Verspätet eintreffende Nutzdaten sind allerdings nicht nur unbrauchbar für die Anwendung selbst, sie stellen zudem eine unnötige Last auf dem Übertragungsmedium des Kommunikationssystem dar, die anderen Datenpaketen das Einhalten deren eigener Zeitschranken erschwert.

Als Maßnahme daraus lässt sich ableiten, dass ein Datenpaket, das absehbar seine Zeitschranke nicht einhalten kann, zu einem frühestmöglichen Punkt in der Übertragungsstrecke verworfen werden sollte. Hierzu kann das Modell zur Übertragungslatenz genutzt werden, bei dem die resultierende Übertragungslatenz der gesamten Übertragungsstrecke des hybriden Kommunikationssystems auf seine Einzelkomponenten heruntergebrochen wird. Für die Schnittstellen zwischen den Komponenten können demnach Kriterien für das Abweisen eines Datenpakets zwischen Systemkomponenten getroffen werden.

Für die Funkkomponente selbst können weitere Maßnahmen ergriffen werden, um Pakete frühzeitig zu verwerfen. Eine einfache Methode besteht darin, die maximale Anzahl an Sendeversuchen beziehungsweise Paketwiederholungen zu begrenzen. Der Freiheitsgrad, dies einstellen zu können, hängt jedoch von der Wahl der Funktechnologie beziehungsweise der konkreten Ausführung des Funkbausteines ab. Für manche Chipsätze ist diese Konfiguration nicht durchführbar, da die Anzahl der Sendeveruche bereits fest in der Sicherungsschicht des Bausteins verankert ist.

Ein weiterer Ansatz für die Funkkomponente beruht darauf, ein Modell für die Bündelfehler der einzelnen Funkstrecken im laufenden Betrieb zu ermitteln – beziehungsweise näherungsweise zu approximieren. Hier kommt der steuerungsseitigen Koppelkomponente die Rolle des Koordinators zu, dem die Auswertung des Modells und seiner Parameter obliegt. Die Herausforderung besteht zum einen darin, die relevanten Informationen vom Funksystem abzugreifen und zum anderen, diese abgegriffenen Informationen ressourcenschonend zu verarbeiten und zu verwalten. Ein echter Mehrgewinn entsteht dann, wenn die Informationen des Fehlermodells mit dem Anforderungsprofil einer Anwendung verknüpft werden können. Der Komplexität der Umsetzung steht die Chance gegenüber, basierend auf dem Bündelfehlermodell dedizierte Datenpakete für typischerweise fehlerfreie Übertragungsstrecken präventiv zu verwerfen, um bei

anderen Datenpaketen die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Übertragung innerhalb der zeitlichen Schranken zu erhöhen.

#### 7.2.3.2.4. Übertaktung – Zykluszeit im steuerungsfernen Sub-System

Den bisherigen Analysen liegt die Annahme zugrunde, dass alle Sub-Systeme ihre zyklische Kommunikation mit der gleichen Zykluszeit  $T_{cyc}$  betreiben – beziehungsweise die steuerungsfernen Sub-Systeme ihre Zykluszeit durch Synchronisationsverfahren auf die Zykluszeit des steuerungsseitigen Sub-Systems abgleichen.

Eine einfache Maßnahme besteht darin, die zyklische Kommunikation der steuerungsfernen Sub-Systeme zu übertakten. Damit kann potenziell sowohl die Übertragungslatenz verringert, als auch die Güte von Synchronisationsverfahren I verbessert werden. Für die Zykluszeit  $T_{cyc,x}$  in Sub-System  $x$  gilt dann

$$T_{cyc,x} = T_{cyc}/k, \quad (7.32)$$

mit  $k \in \mathbb{N}^+$ . Der Aufwand dieser Maßnahme ist gering, da nur die Einstellung eines Parameters betroffen ist. Solange das Industrial-Ethernet-System die Zykluszeit  $T_{cyc,x}$  bereitstellen kann, besteht kein weiterer Nachteil. Den Vorteil erntet insbesondere das Verfahren I zur groben Synchronisation von Sub-Systemen, dessen Datenpuffer für empfangene Datenpakete zwar immer noch mit der Zykluszeit  $T_{cyc}$  befüllt wird. Allerdings wird  $k$ -mal so häufig lesend auf das Datenpuffer zugegriffen, bevor das Datum entnommen wird. Im Idealfall wird daher dasselbe Datum  $k$ -mal gelesen. Bei einem Versatz  $\Delta_{sub}$  zwischen den Sub-Systemen verschiebt sich der Zeitpunkt, ab dem ein Datum entnommen wird, was mit der Maßnahme der Übertaktung mit  $k$ -facher Genauigkeit detektiert und der Phasenregelschleife als Fehlersignal zugeführt werden kann.

#### 7.2.3.2.5. Feintuning – Phasenregelschleife

Als Maßnahme zur Optimierung der Synchronisation kann die Regelungscharakteristik der PLL angepasst werden. Im bisherigen Ansatz werden die Zykluszeiten der Sub-Systeme des hybriden Kommunikationssystems bestimmt und ein Fehlersignal berechnet, das den Versatz der Sub-Systeme approximiert. Dieses Fehlersignal wird über einen Tiefpass geführt und einem PT1-Glied der Regelstrecke der PLL als Eingangsgröße mitgegeben, was einem Proportional (P)-Regler-Verhalten entspricht. Der Grund für den Einsatz dieser Ausführungsform liegt schlicht darin, dass die PLL als integraler Bestandteil der sercos-III-basierten Industrial-Ethernet-Plattform im Demonstratorsystem aus Teil III dieser Arbeit zur Verfügung steht.

Losgelöst von dieser Einschränkung bietet sich andere Regelungscharakteristika für die Synchronisation an, beispielsweise eine Ausführung als Proportional Integral (PI) oder Proportional Integral Derivative (PID)-Regler, die inkrementelle und differenzielle Anteile des Fehlersignals berücksichtigen können. Die Auslegung einer optimalen Regelschleife selbst liegt nicht im Fokus der Arbeit, bietet aber Raum für weitere Forschungsvorhaben. Zudem erfüllen die verfügbaren Verfahren die erforderlichen Anforderungen für die relevanten Anwendungsfälle.

#### 7.2.3.3. Bewertung des Optimierungspotenzials

Abschließend zu diesem Abschnitt fasst Tabelle 7.9 die Maßnahmen zur Optimierung des hybriden Kommunikationssystems zusammen. Jede einzelne Maßnahme wird dabei sowohl

Tabelle 7.9.: Bewertung des Optimierungspotenzials

Maßnahme	Anforderungskriterium			Aufwand
	Latenz	Synchronisation	Robustheit	
Funknetz	○	○	○	●●
Antennentechnik	○	-	●	- / ○ / ●
Paketformung I	○	-	○	- / ○
Paketformung II	●	-	○	- / ○
Paketabweisung	●	-	○	- / ○ / ●
Übertaktung	○	●	-	-
Feintuning	-	●	-	○

hinsichtlich ihrer Wirksamkeit auf die wichtigen Anforderungskriterien industrieller Anwendungen der Feldebene eingestuft als auch auf ihren Aufwand hin abgeschätzt. Aufgrund der unterschiedlichen Maßnahmen ist eine einheitliche Bewertung schwierig, mit Tabelle 7.9 sowie den zugehörigen textuellen Erklärungen sei dennoch der Versuch einer Bewertung gewagt.

Im konkreten Fall profitieren von der Maßnahme *Funknetz* (siehe Abschnitt 7.2.3.1.1) quasi alle Anforderungskriterien. Wenn beispielsweise dedizierte Frequenzressourcen zur Verfügung stehen, sinken Interferenzen durch andere Funkteilnehmer, wovon unmittelbar die Robustheit der Übertragung und damit wiederum die Übertragungslatenz profitieren. Insbesondere erhöht sich auch die Verfügbarkeit des Kommunikationssystems. Der Aufwand hingegen, diese organisatorischen Maßnahmen zu treiben ist erheblich und insbesondere bei der Gremienarbeit von den Interessen unterschiedlicher Organisationen getrieben. Durch den Einsatz zugeschnittener *Antennentechnik* (siehe Abschnitt 7.2.3.1.2) wird konkret die Robustheit der Datenübertragung verbessert. Als Folge davon profitiert indirekt auch die Echtzeitfähigkeit. Der Aufwand dieser Maßnahme reicht von gering, wenn schlicht eine gerichtete Antenne angebracht wird, bis hoch, wenn die Funkvermessung einer ganzen Maschinenhalle durchgeführt wird und Maschinenteile mit geführten Schlitzhohlleitern ausgestattet werden.

Die Maßnahmen zur *Paketformung* (siehe Abschnitte 7.2.3.2.1 und 7.2.3.2.2) zielen in erster Linie darauf, die Last auf dem Übertragungsmedium zu verringern. In Folge dessen wird zum einen die Wahrscheinlichkeit für Eigen-Interferenzen einer Funktechnologie reduziert, was unmittelbar die Robustheit der Datenübertragung verbessert. Zum anderen wird der Wettbewerb um den Medienzugriff entlastet und damit die Wahrscheinlichkeit erhöht, ein Datenpaket innerhalb seiner Echtzeitschranke zu übertragen. Darüber hinaus profitiert die Datenübertragung der Sollwerte einer Steuerung an die Feldgeräte in anderen Sub-Systemen von dem Broadcast, mit dem Mehrpunktverbindungen realisiert werden. Je nach Aufbau der Multi-Device-Frames durch die Steuerung ist wenig bis mäßig großer Aufwand zu investieren, diese Maßnahme umzusetzen.

In gleicher Weise wie die Maßnahmen zur Paketformung zielen die Maßnahmen zur *Paketabweisung* (siehe Abschnitt 7.2.3.2.3) darauf ab, Datenpakete basierend auf gewissen Entscheidungskriterien zu verwerfen und dadurch die Last auf dem Übertragungsmedium zu verringern. In Folge dessen können Latenz und Robustheit der Datenübertragung verbessert

werden. Je feinkörniger diese Kriterien gewählt werden, desto komplexer wird der Aufwand. Erlaubt beispielsweise ein Funksystem, Paketwiederholungen auf der Datensicherungsschicht zu begrenzen, ist wenig Aufwand zu spendieren, um die Maßnahme umzusetzen. Andererseits zieht ein feinkörniges Modell der Übertragungsstrecke mit individuellen Entscheidungskriterien oder die Verwendung eines approximierten Bündelfehlermodell der Funkstrecke eine hohe Komplexität nach sich, die in hohen Implementierungsaufwänden resultiert.

Die Maßnahme der *Übertaktung* (siehe Abschnitt 7.2.3.2.4) kommt in erster Linie der Performance der Synchronisation zugute und erzeugt geringen Mehraufwand. Die Synchronisation profitiert ebenso von einem *Feintuning* (siehe Abschnitt 7.2.3.2.5). Hier kann mit vertretbarem Aufwand und dem Basiswerkzeug der Regelungstechnik die Performance gesteigert werden, sofern das zugrunde liegende Industrial-Ethernet-System eine Übertaktung unterstützt.

### 7.3. Zusammenfassung

Dieses Kapitel stellt die Ausarbeitung des Systementwurfs des hybriden industriellen Kommunikationssystems in der Vordergrund. Dabei setzen alle Ausführungen des verfeinerten Systementwurfs auf dem Fundament der Systemarchitektur des hybriden industriellen Kommunikationssystems auf. Im Kern sieht diese Systemarchitektur vor, bestehende drahtgebundene industrielle Kommunikationssysteme durch Koppelkomponenten derart zu erweitern, dass industrielle Anwendungen auf Anwendungsschicht mittels logischer Geräteverbindungen mit allen Feldgeräten weiterhin nahtlos – auch über Sub-Systemgrenzen hinweg – interagieren können. Zum einen bietet das hybride Kommunikationssystem der Anwendungsschicht dazu eine Schnittstelle in Form eines SAP, zum anderen kapselt es die eigentliche Datenkommunikation, die nun neben dem drahtgebundenen legacy Kommunikationssystem auch über Koppelkomponenten und den damit aufgespannten Funkbrücken realisiert werden kann.

Zentraler Bestandteil des hybriden industriellen Kommunikationssystems ist die Koppelkomponente, die ihrerseits wiederum aus einer Funkkomponente, einer Komponente zur Anbindung an das drahtgebundene Kommunikationssystem und einer Komponente zur Kopplung der funkbasierten, beziehungsweise drahtgebundenen Übertragungsverfahren aufgebaut ist.

Für die Funkkomponente kommen unterschiedliche Funktechnologien in Betracht, wofür zum einen existierende Funkstandards evaluiert, zum anderen eine idealtypische Funktechnologie für die Anforderungen des hybriden industriellen Kommunikationssystems abgeleitet werden. Der Fokus bei standardisierten Funktechnologien liegt auf der IEEE-802.xx-Familie, da diese in den frei verfügbaren ISM-Bändern funkt und ob der regulatorischen Einschränkungen als derzeit einzige Bänder für industrielle Anwendungen mit den hier formulierten Anforderungen zur Verfügung stehen. So kann aus den Anforderungsprofilen industrieller Anwendungen der Feldebene auf eine minimale Systemkapazität  $R_{peak}$  einer Funktechnologie geschlossen werden, von denen einzig IEEE 802.11n diese Anforderungen erfüllt.

Im Hinblick auf die Echtzeitanforderungen tragen in erster Linie die Art des Medienzugriffs und die Effizienz der Datenübertragung zur Übertragungslatenz bei. Ferner stellt die Effizienz der Übertragung bei gegebenen Funkstandard eine Stellschraube zur Optimierung dar, indem beispielsweise Datenpakete derart geformt werden, dass der Nutzdatenanteil erhöht wird oder Datenpakete anhand messtechnisch erfasster Kriterien abgewiesen werden. Beide Optimie-

rungsstrategien reduzieren die Last auf dem Übertragungsmedium und führen somit zu einer Steigerung der Effizienz der Übertragung und schließlich zu einer Reduzierung der Übertragungslatenz. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass unabhängig von Optimierungspotenzialen die funkbasierte Übertragung mit Standardkomponenten der IEEE-802.xx-Familie, insbesondere mit IEEE 802.11n, die Echtzeitanforderungen industrieller Anwendungen erfüllen kann. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass das Funksystem des hybriden Kommunikationssystems als physikalische Einzelpunktverbindung ausgelegt wird. Erfordert eine industrielle Anwendung hingegen die Auslegung physikalischer Mehrpunktverbindungen, so sind Funkkomponenten basierend auf IEEE 802.11n nur noch bedingt geeignet.

Die Anbindung an das drahtgebundene Kommunikationssystem realisiert die Koppelkomponente durch eine Industrial-Ethernet-Komponente. Der Vorzug dieser Auswahl liegt zum einen darin, dass die Industrial-Ethernet-Technologie als Nachfolger der klassischen Feldbusse den Stand der Technik für drahtgebundene Kommunikationssysteme repräsentiert. Ferner können bei Industrial-Ethernet-Systemen vom Typ 3 mit ihren Eigenschaften wie Multi-Device-Frames und Summenrahmenprotokoll gezielte Optimierungen für den Einsatz in hybriden Kommunikationssystemen eingebracht werden. Aus der Leistungsfähigkeit des Industrial-Ethernet-Systems selbst erwachsen nach Evaluierung keine Einschränkungen hinsichtlich der Verwendbarkeit innerhalb der Koppelkomponente eines hybriden Kommunikationssystems.

Die Konvergenzschicht schließlich stellt in der Koppelkomponente das Bindeglied zwischen der Funk- und der Industrial-Ethernet-Komponente dar. Zu ihren Hauptaufgaben zählt es, das Summenrahmenprotokoll im Zusammenspiel mit der Industrial-Ethernet-Komponente zu terminieren und zu initiieren. Darüber hinaus obliegt es der Konvergenzschicht, einen Teil der Optimierungen wie Paketformung, Paketabweisung und Übertaktung zu implementieren. Im Ergebnis spannt die Konvergenzschicht für das hybride Kommunikationssystem eine Industrial-Ethernet-Brücke auf.

Neben dem Entwurf der Koppelkomponente selbst stellt die Synchronisation aller Geräte einer industriellen Anwendung die wichtigste Querschnittsfunktion des hybriden Kommunikationssystems dar. Basierend auf statischen Kenngrößen werden zwei Synchronisationsverfahren evaluiert und Optimierungspotenziale dieser Verfahren adressiert. Entsprechend der Anwendungsfälle erfüllt Verfahren II die Anforderungen feiner Synchronisation, während Verfahren I den Anforderungen der groben Synchronisation genügt.

Die Konfiguration des hybriden Kommunikationssystems und damit auch die Optimierungsstufen der einzelnen Bestandteile des Koppelkomponente werden bei der Inbetriebnahme des hybriden Kommunikationssystems gewählt. Für die Inbetriebnahme kristallisiert sich der Bottom-up-Ansatz als vielversprechend heraus, da dort schrittweise im Rahmen des Auf- und Ausbaus einer industriellen Anwendung einzelne Gerätegruppen stufenweise integriert werden können.

Die Ergebnisse des verfeinerten Systementwurfs dieses Kapitel 7 werden in Teil III der Arbeit mit praktischen Anwendungsbeispielen unterfüttert und hinsichtlich der Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit überprüft. Zuvor soll im folgenden Kapitel 8 ein Zwischenfazit zu Teil II der Arbeit gezogen werden.

## 8. Zwischenfazit II

Die theoretische Modellbildung und Systematisierung waren der vorrangige Gegenstand von Teil II dieser Arbeit. Zu diesem Zweck wurde aus den in Teil I dieser Arbeit abgeleiteten Anforderungen an ein industrielles Kommunikationssystem auf Feldebene der entsprechende Lösungsraum aufgespannt. In diesem Lösungsraum wurde zum einen mittels der Grundprinzipien der Nachrichtentechnik, zum anderen mittels grundlegender Muster der System- und Software-Architektur ein systematisiertes Modell eines hybriden industriellen Kommunikationssystems erstellt und entsprechende Lösungen entworfen.

### 8.1. Treiber und Konzepte

Gemäß der grundlegenden Prinzipien *Divide and Conquer* und *Separation of Concerns* wurden die Funktionalitäten des hybriden industriellen Kommunikationssystems schrittweise in einzelne Bestandteile heruntergebrochen. Diese einzelnen funktionalen Bestandteile wurden identifiziert, beschrieben und dedizierten Komponenten beziehungsweise Schichten zugeordnet, die diese Funktionalitäten nicht nur umsetzen, sondern auch im objektorientierten Sinne kapseln. Hinsichtlich einer strikten Auslegung des Schichtenmodells interagieren dann verschiedene Entitäten einer Schicht mittels Protokollen miteinander, was transparent und unabhängig von unterliegenden Schichten erfolgt. Zwischen den Schichten ermöglicht ein SAP als standardisierte Schnittstelle den Zugriff auf Dienste einer unterliegenden Schicht. Im konkreten Fall bietet die Kommunikationsschicht der Anwendungsschicht einen SAP, über den logische Geräteverbindungen konfiguriert und regelungstechnische Anwendungen realisiert werden können (siehe Abschnitt 5.2.2.1) .

Der Einsatz eines Schichtenmodells und die objektorientierte Kapselung von Funktionalitäten in Komponenten bilden die grundlegenden Voraussetzungen für eine modulare und flexi-

Tabelle 8.1.: Implizite Anforderungen und abgeleitete Architekturkonzepte.

Problemraum – Anforderungen	Lösungsraum – Konzepte
Kommunikation als <i>Black Box</i>	→ Kapselung und Schichtenmodell → Service Access Point (SAP)
<i>Drahtgebundenes legacy</i> System	→ hybrides Kommunikationssystem → Koppelkomponente
<i>Nahtlose</i> Integration	→ logische Geräteverbindung → Koppelkomponente
<i>Flexible</i> Konfiguration	→ Industrial-Ethernet-Brücke → Sub-System

bel auslegbare Systemarchitektur. Das Konzept und die Designentscheidung für eine flexible Systemarchitektur gründen auf einer Reihe von Treibern, die sich primär aus den impliziten, nicht funktionalen Anforderungen (siehe Abschnitt 2.5) und typischerweise weniger aus den funktionalen, explizit formulierten Anforderungsprofilen (siehe Abschnitt 2.3.2) ableiten lassen. Tabelle 8.1 listet diese bereits in Teil I diskutierten, impliziten Anforderungen und stellt ihnen die in Teil II erarbeiteten, resultierenden Architekturkonzepte gegenüber.

- So geht aus der impliziten Anforderung, den Kommunikationsteil einer industriellen Anwendung als *Black-Box* zu betrachten, das Konzept eines Schichtenmodells für industrielle Anwendungen hervor, das die Funktionalitäten der eigentlichen Anwendung einer Anwendungsschicht und die der Kommunikation einer Kommunikationsschicht zuordnet. Zum einen kapselt die Kommunikationsschicht interne Funktionalitäten der Kommunikation, zum anderen exponiert sie der Anwendungsschicht ihre Dienste über ihren SAP.
- Das Konzept eines hybriden Kommunikationssystems gründet auf der Anforderung, dass stets ein *drahtgebundenes legacy* System wie Industrial Ethernet vorhanden beziehungsweise vorausgesetzt wird. Für die konkrete Umsetzung übernimmt eine Koppelkomponente die Funktionalität, funkbasierte Teilkomponenten an das drahtgebundene legacy System anzubinden.
- Im Kern basiert die logische Geräteverbindung auf dem Schichtenmodell industrieller Anwendungen. Sie wird durch ein Protokoll umgesetzt, das auf der Anwendungsschicht zwischen den Entitäten einer Steuerung und ihren Feldgeräten operiert. Das Konzept der logischen Geräteverbindung zum einen, sowie das Konzept der Koppelkomponente zum anderen, tragen der Anforderung nach einer *nahtlosen Integration* funkbasierter Teilkomponenten in drahtgebundene legacy Systeme Rechnung.
- Auf Grundlage dieser auf Modularisierung ausgelegten Systemarchitektur bestehend aus Koppelkomponente, Schichtenmodell und logischen Geräteverbindungen, kann schließlich die Anforderung einer *flexiblen Systemkonfiguration* erfüllt werden. Zur konkreten Umsetzung tragen die Konzepte der Gruppierung von Sub-Systemen bei, die durch Industrial-Ethernet-Brücken jede legacy Steuerung mit allen Feldgeräten eines jeden Sub-Systems verbinden.

## 8.2. Bewertung der Lösungen

In diesem Kontext stellt das Konzept der Industrial-Ethernet-Brücke eine konkrete Realisierungsform eines hybriden industriellen Kommunikationssystems dar. Abbildung 8.1 fasst die Komponenten und Funktionalitäten der Industrial-Ethernet-Brücke zusammen. Zunächst setzt sich die Industrial-Ethernet-Brücke aus zwei Koppelkomponenten zusammen. Jede Koppelkomponente besteht aus Konvergenzschicht, Industrial-Ethernet-Slave beziehungsweise -Master sowie Funk-Master beziehungsweise -Slave. Als Industrial-Ethernet-System wird sercos III und seine entsprechenden Komponenten eingesetzt. Das Summenrahmenprotokoll terminiert in der sercos-III-Slave-Komponente der steuerungsseitigen Koppelkomponente und wird in der Master-Komponente der steuerungsfernen Koppelkomponente neu aufgespannt. Dazwischen wandelt die Konvergenzschicht die Protokolle der Teilsysteme, extrahiert beziehungsweise injiziert die anwendungstechnischen Nutzdaten und führt diese über die Funkbrücke.

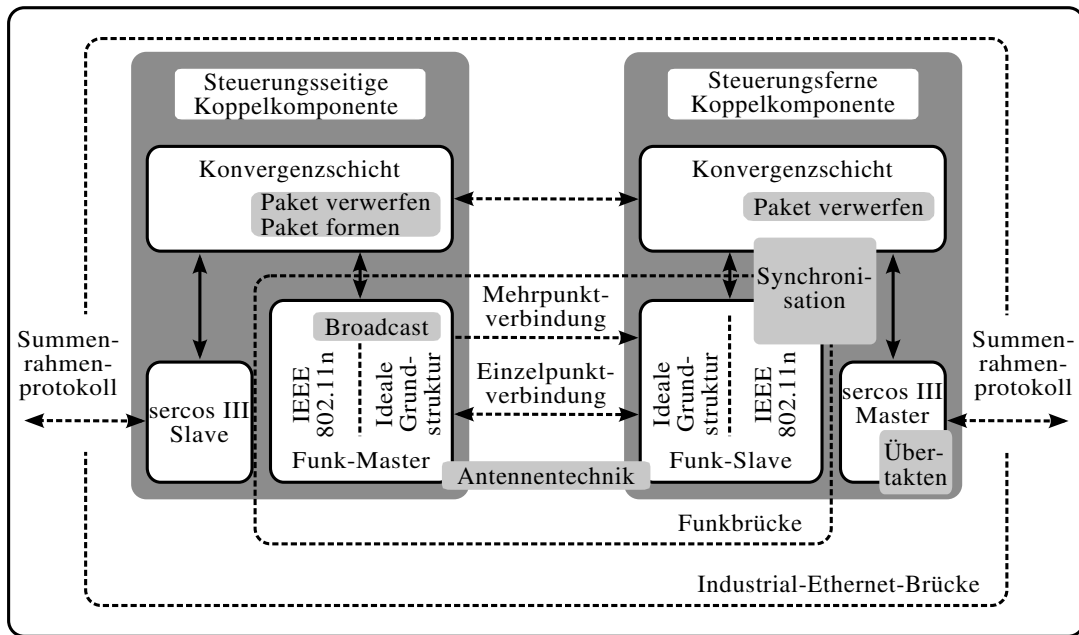


Abbildung 8.1.: Feinstruktur der Industrial-Ethernet-Brücke des hybriden industriellen Kommunikationssystems.

Die Funkbrücke besteht aus einem Funk-Master und einem oder mehreren Funk-Slaves. Die Funkkomponenten können durch unterschiedliche Funktechnologien repräsentiert werden. Gemäß Abbildung 8.1 kommt in einer Ausführung der Funkstandard IEEE 802.11n zum Einsatz, in einer anderen Ausführung die idealtypische, echtzeitfähige Grundstruktur (siehe Abschnitt 7.1.1.2.1). Je nach Übertragungsrichtung können unterschiedliche Übertragungskonzepte eingesetzt werden. So verteilt der Funk-Master seine Datenpakete implizit – gegebenenfalls über physikalische Mehrpunktverbindungen – an einen oder mehrere Funk-Slaves. Die Funk-Slaves hingegen übermitteln ihre Datenpakete explizit per Einzelverbindung an den Funk-Master.

Darüber hinaus stellt Abbildung 8.1 weitere Querschnittsfunktionen und Optimierungsmaßnahmen schematisch dar und ordnet sie den dedizierten Komponenten zu. Zur Wirksamkeit des Synchronisationsverfahrens tragen nahezu alle Komponenten der steuerungsfernen Koppelkomponente bei. Der Funk-Slave liefert zunächst zeitliche Informationen über die empfangenen Datenpakete in Form von Zwischenankunftszeiten. Die Konvergenzschicht führt damit eine Regelungslogik aus, deren abgeleitete Stellgröße schließlich der sercos-III-Master anwendet. Die Maßnahmen zur Optimierung der Leistungsfähigkeit des hybriden Kommunikationssystems verteilen sich gemäß Abbildung 8.1 auf alle Systemkomponenten.

Tabelle 8.2 bietet schließlich eine Bewertungsmatrix für ausgewählte Kriterien des hybriden Kommunikationssystem bezogen auf die Anwendungsbeispiele der Fallstudien, die in Teil III dieser Arbeit zur Evaluierung der Lösungen dienen. Hierbei zeigt sich, dass die Systemarchitektur und die mit ihr einhergehenden Konzepte wie die Anbindung abgesetzter, steuerungsferner Sub-Systeme und deren Synchronisation für beide Fallbeispiele tragen. Im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit der einzelnen Technologien erweist sich die Industrial-Ethernet-Komponente



Tabelle 8.2.: Bewertung des hybriden industriellen Kommunikationssystems hinsichtlich der Anwendungsbeispiele aus Teil III.

Bewertungskriterium	Fallbeispiele gemäß Teil III	
	Rundtaktmaschine	Verpackungsmaschine
Systemsicht		
– Anbindungskonzepte	•	•
– Synchronisationskonzepte	•	•
Komponentensicht		
– Industrial-Ethernet-System	•	•
– Funksystem	•	○

als robust und ohne Einschränkung einsetzbar. Bei der Auswahl des Funksystems ist genauer zu differenzieren: Im Fallbeispiel der Rundtaktmaschine reduziert sich die Funkbrücke auf eine physikalische Einzelpunktverbindung, was bei entsprechender Auslegung mit funkbasierten Standardkomponenten realisiert werden kann. Andererseits erfordert das Fallbeispiel der Verpackungsmaschine funkbasierte physikalische Mehrpunktverbindungen, für die sich kostengünstige Standardkomponenten vorrangig aufgrund ihrer Medienzugriffsverfahren nur eingeschränkt eignen. In Teil III dieser Arbeit werden diese Konzepte ausführlicher diskutiert.

In Summe zeigt sich das hybride industrielle Kommunikationssystem damit aufgrund seiner Systemarchitektur und seines Designs als flexibel konfigurierbar und vielseitig einsetzbar. Abhängig von der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Funksysteme ist der Bedarf nach physikalischen Mehrpunktverbindungen als kritische Größe zu sehen, die eine Begrenzung für die Leistungsfähigkeit des gesamten Kommunikationssystems darstellt.



**Teil III.**

## **Evaluierung mit Fallstudien**

## 9. Lösung mit Standardkomponenten

In diesem Kapitel wird der Systementwurf des hybriden industriellen Kommunikationssystems aus Teil II dieser Arbeit auf das Fallbeispiel einer Rundtaktmaschine angewendet. Für die konkreten Anforderungen dieser Anwendung erweist sich der Einsatz von IEEE-802.11n-basierten Standardkomponenten in Kombination mit einer physikalischen Einzelpunktverbindung als geeignete Lösung.

Im folgenden Abschnitt 9.1 wird zunächst das Fallbeispiel einer Rundtaktmaschine und deren konkrete Anforderungen veranschaulicht. Anschließend wird in Abschnitt 9.2 die Umsetzung des industriellen hybriden Kommunikationssystems für die Parameter dieses Fallbeispiels mittels eines Demonstrators beschrieben. Schließlich werden die damit erzielten Messergebnisse analysiert, und die Wirksamkeit der Lösung wird bewertet.

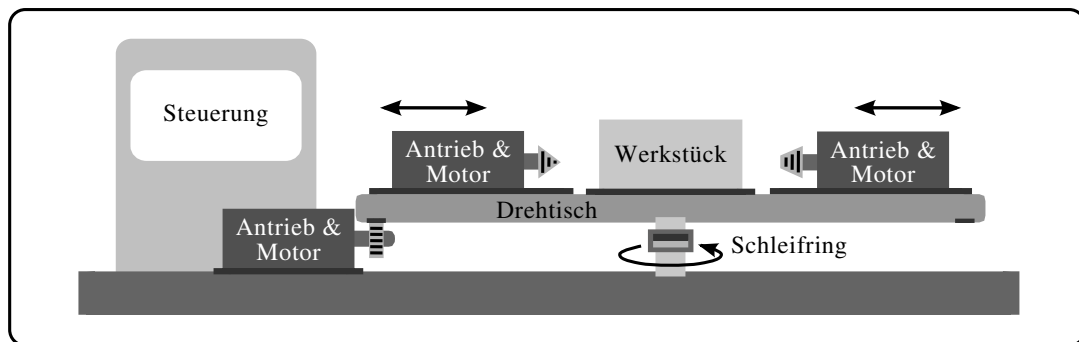
### 9.1. Anwendungsbeispiel Rundtaktmaschine

Gemeinhin stellen Rundtaktmaschinen eine spezialisierte Ausführung von Werkzeugmaschinen dar, die klassischerweise den Anwendungen der Feldebene der Fertigungsautomatisierung zuzuordnen sind. Das primäre Einsatzgebiet für Rundtaktmaschinen ist die mechanische Bearbeitung von Werkstücken. Dazu finden unterschiedliche Fertigungsverfahren wie Fräsen, Bohren, Kleben und andere Verwendung.

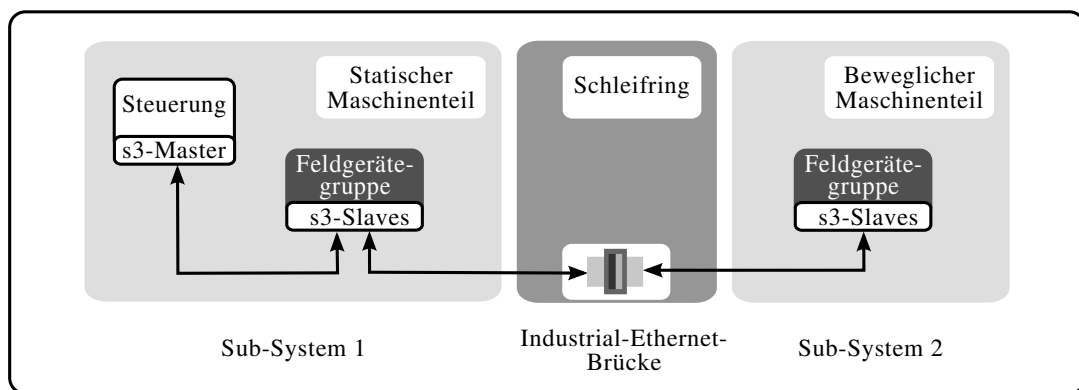
#### 9.1.1. Eigenschaften der Anwendung

Im Kern regelt bei einer Rundtaktmaschine eine zentrale Steuerung eine Gruppe von Werkzeugen, die zeitgleich und konzertiert die Bearbeitung eines Werkstückes übernehmen. Die Bearbeitungsschritte erfolgen getaktet und sequenziell, sodass pro Verarbeitungstakt der Maschine stets ein Werkstück bearbeitet wird. Abbildung 9.1a veranschaulicht den schematischen Aufbau einer Rundtaktmaschine. Im Zentrum der Maschine steht ein Drehtisch, auf dem ein Werkstück durch die Werkzeuge der Maschine bearbeitet wird. Die Werkzeuge werden typischerweise durch Antriebe und Motoren realisiert, die von einer zentralen Steuerung kontrolliert werden. Dazu ist die Steuerung über einen Schleifring mit den Werkzeugen auf dem Drehtisch verbunden. Über diesen Schleifring werden sowohl Datensignale als auch die zur Versorgung der Werkzeuge benötigte Energie geführt.

Der Drehtisch selbst wird gemäß Abbildung 9.1a von einer weiteren Feldgerätegruppe angetrieben, die ebenso von der zentralen Steuerung kontrolliert wird. Aufgabe dieses statischen Maschinenteils ist es, den Drehtisch stets so auszurichten, dass der Maschine zunächst ein Werkstück zugeführt werden kann, die Werkzeuge der Maschine die Bearbeitung des Werkstückes ausführen können, und nachfolgend das Werkstück der Maschine wieder entnommen werden kann. Typischerweise wird hierfür zu Beginn des Verarbeitungstaktes ein Werkstück auf dem Drehtisch gespannt. Der Drehtisch wird in diejenige Position gefahren, in



(a) Schematischer Aufbau einer Rundtaktmaschine.



(b) Modellbildung für die Rundtaktmaschine.

Abbildung 9.1.: Anwendungsbeispiel einer Rundtaktmaschine.

der die Werkzeuge das Werkstück bearbeiten können. Zum Ende des Verarbeitungstaktes wird der Drehtisch so positioniert, dass das bearbeitete Werkstück dem nächsten Prozessschritt, beispielsweise einer nachfolgenden Maschine, zugeführt wird.

Abbildung 9.1b zeigt das schematische Systemmodell der Rundtaktmaschine. Die Maschine unterteilt sich in einen statischen und einen beweglichen Maschinenteil. Beide Teile sind durch einen Schleifring verbunden, der im Kontext des hybriden Kommunikationssystems als Industrial-Ethernet-Brücke modelliert wird. Der bewegliche Maschinenteil umfasst die Feldgeräte, genauer die Werkzeuge, die sich auf dem Drehtisch der Maschine befinden und das Werkstück bearbeiten. Die zentrale Steuerung ist zusammen mit der anderen Feldgerätegruppe, die die Positionierung des beweglichen Maschinenteils übernimmt, dem statischen Maschinenteil zugeordnet. Das drahtgebundene Teilsystem des hybriden Kommunikationssystems wird durch das Industrial-Ethernet-basierte sercos III realisiert. Das heißt, die zentrale Steuerung implementiert den sercos-III-Master, der die sercos-III-Slaves der Feldgerätegruppen über das Summenrahmenprotokoll adressiert. Dies erfolgt über die Industrial-Ethernet-Brücke und die über sie geführten logischen Geräteverbindungen zu allen Feldgeräten der Anwendung.

Im Hinblick auf ihr Anbindungskonzept stellt die Industrial-Ethernet-Brücke mittels eines Schleifrings die Kopplung von Sub-Systemen auf Bitübertragungsschicht her. Für die funkbasierte Industrial-Ethernet-Brücke hingegen ist eine Kopplung auf Sicherungsschicht

Tabelle 9.1.: Anforderungen für das Fallbeispiel der Rundtaktmaschine.

Anforderung	Kenngröße	Wertebereich	Beschreibung
Knotenzahl	$N$	30	Gesamtzahl der Feldgeräte
	$N'$	2	Anzahl der Maschinenteile
Datenrate	$r_{x,n}$	50 kbps	pro Feldgerät
	$\frac{N}{N'} \cdot r_{x,n}$	750 kbps	pro Maschinenteil
Synchronisation	$\gamma_s, \gamma_i$	$20 \mu\text{s}$	innerhalb eines Maschinenteils
	$ \Delta_{sub} $	$\frac{T_{cyc}}{2}$	zwischen Maschinenteilen (Gl. (7.29))
Übertragungslatenz	$D_{x,n}$	2,5 ms	für alle Feldgeräte
Aktualisierungszeit	$T_{up}$	5,0 ms	

nötig, da das Summenrahmenprotokoll von sercos III einerseits terminiert und andererseits durch einen weiteren sercos-III-Master in der Koppelkomponente für die Feldgerätegruppe des steuerungsfernen Sub-Systems neu aufgesetzt werden muss.

Abschließend lässt sich für das Fallbeispiel der Rundtaktmaschine festhalten, dass Schleifringe durchaus eine technische Lösungsmöglichkeit für die Kopplung beweglicher Maschinenteile bieten. Allerdings resultieren diese Lösungen in mitunter hohen Kosten. Insbesondere steigen die Kosten mit der Komplexität des Schleifrings, die sich in der Anzahl der über den Schleifring geführten Signale widerspiegelt. Hierzu zählen sowohl Leistungs- als auch Datensignale. Ferner unterliegen Schleifringe einem hohen Verschleiß, der kurze Wartungsintervalle erfordert und dadurch spürbare Mehrkosten bei der Maschinenwartung mit sich bringt. Für solche Anwendungsfälle bietet sich als kostengünstigere Alternative eine Kombination aus funkbasierter Datenübertragung und Schleifring-basierter Leistungsübertragung an. Die für die Funkübertragung resultierenden Anforderungen werden im folgenden abgeleitet.

### 9.1.2. Resultierende Anforderungen

Für die Beispielanwendung fasst Tabelle 9.1 die resultierenden Anforderungen an die funkbasierte Datenübertragung zusammen. Charakteristisch für die Rundtaktmaschine sind ihre  $N' = 2$  Maschinenteile – ein beweglicher und ein statischer Maschinenteil. Auf diese beiden Maschinenteile verteilen sich insgesamt  $N$  Feldgeräte, von denen jedes Feldgerät  $n$  eine feste Datenmenge  $r_{x,n}$  pro Übertragungsrichtung  $x \in \{c, a\}$  und Maschinenzyklus  $T_{up}$  produziert und konsumiert. Im ungünstigsten Falle hinsichtlich der Systemkapazität – dies entspricht einer Gleichverteilung der Feldgeräte zwischen den Maschinenteilen – ergibt sich für die Funkstrecke eine akkumulierte Datenrate  $\frac{N}{N'} \cdot r_{x,n}$  pro Übertragungsrichtung und Maschinenteil. Gemäß der Heuristik nach Gleichung (7.9) kann so die konkrete Anforderung  $R_{peak} > 5,25 \text{ Mbps}$  an die Systemkapazität des Funksystems formuliert werden.

Im Hinblick auf die Synchronisation innerhalb eines Maschinenteils gelten sowohl die Anforderungen an die Isochronität eines Feldgerätes zwischen Kommunikationszyklen  $\gamma_i$  als auch die Synchronität zwischen den Feldgeräten eines Maschinenteils  $\gamma_s$ . Für die geringeren Anforderungen der lose gekoppelten Maschinenteile genügt die Synchronisationsklasse grob

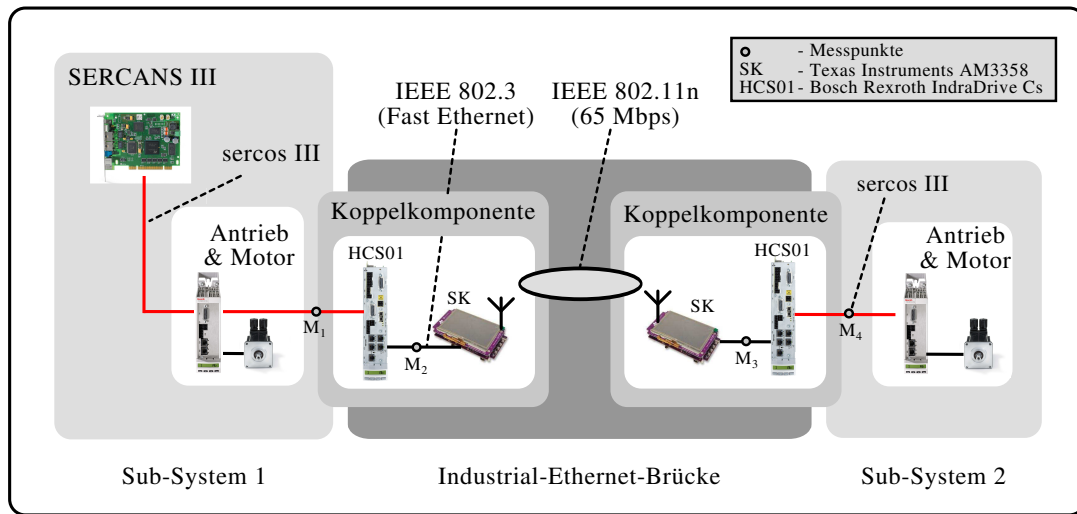


Abbildung 9.2.: Demonstratorsystem für die Beispielanwendung einer Rundtaktmaschine.

synchronisierter Sub-Systeme, wofür Synchronisationsverfahren I zur groben Synchronisation eingesetzt werden kann.

Die Anforderungen an die zeitlichen Schranken der Übertragungslatenz  $D_{x,n}$  als auch an die Aktualisierungszeit  $T_{up}$  gelten gleichermaßen für alle Feldgeräte der Anwendung – unabhängig von der Zugehörigkeit zu einem bestimmten Maschinenteil.

## 9.2. Umsetzung mit Demonstratorsystem

Zur Umsetzung des hybriden industriellen Kommunikationssystems für das Anwendungsbeispiel der Rundtaktmaschine wird ein Demonstratorsystem aufgebaut. Im nachfolgenden Abschnitt 9.2.1 wird der Aufbau dieses Demonstratorsystems beschrieben. Die damit erzielten Ergebnisse werden in Abschnitt 9.2.2 analysiert, bevor in Abschnitt 9.2.3 eine abschließende Bewertung des Lösungsansatzes erfolgt.

### 9.2.1. Demonstratorsystem

Abbildung 9.2 zeigt den schematischen Aufbau des Demonstratorsystems für die prototypische Umsetzung der Rundtaktmaschine. Jedes Feldgerät wird durch eine Kombination aus elektrischem Antrieb [135] und Servomotor [136] repräsentiert. Ferner beinhaltet jede Antriebskomponente einen sercos-III-Slave. Die zentrale Steuerung wird durch eine SERCANS-III-PCI-Karte [137] abgebildet, die zum einen den sercos-III-Master in Sub-System 1 realisiert, zum anderen eine dünne Anwendungsschicht bereitstellt, über die Anwendungsdaten generiert und an die Kommunikationsschicht weitergereicht werden können. Die Anwendungsdaten der Fallstudie werden der SERCANS-Karte mittels des Engineering Tools IndraWorks [138] bei der Inbetriebnahme aufgeprägt.

### 9.2.1.1. Aufbau der Koppelkomponente

Im Zentrum des Demonstratorsystems steht die Industrial-Ethernet-Brücke, die durch zwei Koppelkomponenten zwischen Sub-System 1 und Sub-System 2 – beziehungsweise zwischen dem statischen und dem beweglichen Maschinenteil – aufgespannt wird. Jede Koppelkomponente besteht selbst wiederum aus zwei Bestandteilen, einer Antriebskomponente – einer HCS01 der IndraDrive-Cs-Familie von Bosch Rexroth [135] – zur Anbindung an sercos III und einem AM3358 Starter Kit (SK) von Texas Instruments [139] zur Realisierung der IEEE 802.11n-basierten Funkbrücke.

Als Auswahlkriterium zu Gunsten des SK spricht zum einen die Verfügbarkeit einer hochratigen, integrierten Funktechnologie, die latenzarm und zuverlässig per Secure Digital Input Output (SDIO) an den Hauptprozessor angebunden ist. Des weiteren zeichnet sich das SK durch eine aktive Entwickler-Community aus, verfügt über eine transparente Toolchain sowie offene Treiber für seine Netzwerk-Infrastruktur. Genauer betrachtet, bietet das SK über sein integriertes WL1271L-Funkmodul [140] unter anderem eine IEEE-802.11n-basierte Funkkomponente, die mit einem Datenstrom ( $N_{str} = 1$ ) eine Systemkapazität von  $R_{peak} = 65$  Mbps erreicht und so die Anforderungen der Fallstudie hinsichtlich des Datenratenbedarfs  $R_{peak} > 5,25$  Mbps abdeckt.

Das WL1271L-Funkmodul ist mit dem ARM Cortex-A8-Prozessor des SK über ein SDIO-Interface verbunden, das mit 25 MHz getaktet wird. Das SK läuft mit einer Linux Distribution, die auf dem Linux Kernel 3.2.0 basiert, und für die Software-Pakete mit der Linaro-GCC-4.7-Toolchain<sup>1</sup> auf einer Ubuntu-12.04-LTS-basierten Host-Maschine cross-kompiliert werden. Für die Ansteuerung des Funkmoduls kommt die Wireless-Linux-Treiber-Suite<sup>2</sup> zum Einsatz. An der drahtgebundenen Gegenstelle sendet und empfängt der Prozessor Raw-Ethernet-Frames über seine Fast-Ethernet-Schnittstelle, die durch die CPSW-Treiber [141] betrieben wird. Über ein Socket-basiertes Anwendungsprogramm im Linux User-Space leitet der Prozessor die Raw-Ethernet-Frames zwischen den Schnittstellen weiter.

Die HCS01-Komponente der Koppelkomponente übernimmt zum einen die Aufgabe, mit den Feldgeräten per sercos III zu kommunizieren. Ferner implementiert sie die Funktionalität der Konvergenzschicht. Das heißt, sie terminiert das Summenrahmenprotokoll – zusammen mit dem sercos-III-Slave – in der steuerungsseitigen und sie erzeugt das Summenrahmenprotokoll – zusammen mit dem sercos-III-Master – in der steuerungsfernen Ausführung der Koppelkomponente. Der Payload des Summenrahmenprotokolls wird aus den Multi-Device-Frames extrahiert, in Raw-Ethernet-Frames verpackt und an das SK zur Übertragung über die Funkbrücke weitergereicht. Hierzu wird einer der Ethernet-Ports der HCS01-Komponente für die Übertragung von Raw-Ethernet-Frames konfiguriert.

Durch ihren modularen Aufbau aus zwei Sub-Komponenten erweist sich die Koppelkomponente dahingehend als flexibel, als dass sowohl der Betrieb als steuerungsseitige als auch als steuerungsferne Koppelkomponente möglich ist. In der Ausführung als steuerungsseitige Koppelkomponente wird demnach die HCS01-Komponente als sercos-III-Slave ausgeführt – in der steuerungsfernen Koppelkomponente entsprechend als sercos-III-Master. Für die Funkbrücke

<sup>1</sup><https://releases.linaro.org/archive/13.05/components/toolchain/gcc-linaro/4.7/>

<sup>2</sup><https://wireless.wiki.kernel.org/>



wird die Funkkomponente im SK der steuerungsseitigen Koppelkomponente als Funk-Master – beziehungsweise im Sinne von IEEE 802.11 als AP – konfiguriert, die Funkkomponente der steuerungsfernen Koppelkomponente entsprechend als Funk-Slave – beziehungsweise als Client.

### 9.2.1.2. Konfiguration und Inbetriebnahme

Die Konfiguration und Inbetriebnahme des Demonstrators erfolgt schrittweise nach dem Bottom-Up-Prinzip (siehe Abschnitt 7.2.1.2) mit Hilfe des Engineering-Tools IndraWorks [138]. Dabei wird ausgenutzt, dass die HCS01-Komponente per se dafür ausgelegt ist, Sub-Systeme unter ihrem integrierten sercos-III-Master aufzuspannen. So kann die HSC01-Komponente selbst als kleine Steuerung für untergeordnete Antriebsgeräte betrieben werden, oder sie kann in einem anderen Modus Nutzdaten einer übergeordneten zentralen Steuerung an ihre untergeordneten Antriebsgeräte weiterreichen. Im Demonstratorsystem wird die HCS01-Komponente der steuerungsfernen Koppelkomponente für den letztgenannten Modus konfiguriert. Aus Sicht der zentralen Steuerung sind somit die logischen Geräteverbindungen zu den Antriebskomponenten in Sub-System 2 konfiguriert.

Für das IEEE-802.11n-basierte Funksystem wird die Funkkomponente in der steuerungsseitigen Koppelkomponente als AP konfiguriert. Dies erfolgt über den Linux-Daemon *hostapd*<sup>3</sup>. Jedes Feldgerät durchläuft im Zuge der Inbetriebnahme die sercos-III-spezifischen Kommunikationsphasen (siehe Abschnitt 7.2.1.1), bis das jeweilige Feldgerät durch Signalisierung des im SERCOS-Antriebsprofil definierten Steuerwortes in den operativen Betriebsmodus geschaltet wird. Ab diesem Zeitpunkt werden die Anwendungsdaten der zyklischen Kommunikation über die logischen Geräteverbindungen zwischen Steuerung und Feldgeräten ausgetauscht.

Schließlich wird mittels der Anwendungsschicht der SERCANS-III-PCI-Karte eine Geschwindigkeitsregelung als Regelschleife konfiguriert. Diese füttert zyklisch mit Periode der Aktualisierungszeit  $T_{up}$  den sercos-III-Master mit Nutzdaten und nimmt empfangene Ist-Daten auf.

## 9.2.2. Ergebnisse

Die im folgenden diskutierten Messergebnisse beziehen sich auf das Fallbeispiel der Rundtaktmaschine, das sich nach der Inbetriebnahme des Demonstratorsystems im operativen Betriebsmodus befindet. Die Anwendung selbst generiert Daten entsprechend der Anforderungen in Tabelle 9.1. Im nachfolgenden Abschnitt 9.2.2.1 wird zunächst der Messaufbau und das zugehörige Equipment beschrieben, bevor in den anschließenden Abschnitten die Ergebnisse einzelner Messgrößen evaluiert werden.

### 9.2.2.1. Messgrößen und Parameter

Für die Messdurchführung wird die Regelungsschleife der Anwendung mit unterschiedlichen Aktualisierungszeiten  $T_{up}$  betrieben. Wie für Motion-Control-basierte Anwendungen üblich, entspricht die Zykluszeit  $T_{cyc}$  des Kommunikationssystems der Aktualisierungszeit  $T_{up}$  der anwendungsseitigen Regelung. Im konkreten Fall gilt daher  $T_{cyc,1} = T_{cyc} = T_{up}$ . Das Sub-System 2 kann weiterhin mit einer von der Anwendung unabhängigen Zykluszeit  $T_{cyc,2}$  betrieben werden, so dass eine Übertaktung mit Faktor  $k = T_{cyc,1}/T_{cyc,2} > 1$  für  $T_{cyc,2} < T_{cyc,1}$

<sup>3</sup><http://w1.f/hostapd/>

Tabelle 9.2.: Messgrößen und Parameter für Fallstudie Rundtaktmaschine.

Kategorie	Parameter	Wertebereich	Beschreibung
Anwendung	<i>Anwendungsfall - Geschwindigkeitsregelung</i>		
	$N'$	2	Anzahl der Sub-Systeme
	$\{r_{c,n}, r_{a,n}\}$	$\{30, 50\}$ kbps	{Soll-, Ist-} Werte
	$T_{up}$	$\{1, 2, 3, 4\}$ ms	Aktualisierungszeit
Kommunikation	<i>Synchronisation - Grob synchronisiert</i>		
	$\gamma$	$20\mu s$	Innerhalb eines Sub-Systems
	$\Delta_{sub}$	$T_{up}/2$	Zwischen Sub-Systemen
	<i>Industrial Ethernet - sercos III</i>		
	$T_{cyc,1}$	$T_{up}$	Sub-System 1
	$T_{cyc,2}$	1 ms	Sub-System 2
	<i>Funksystem - IEEE 802.11n</i>		
	$R_{peak}$	65 Mbps	Systemkapazität
	MAC	CSMA/CA	Medienzugriffsschema
	Band	2,4 GHz	Frequenzband
Messung	<i>Messparameter</i>		
	Umgebung		Büroumgebung
	Sendeleistung	10 dBm	Einstellung mittels SK
	Messdauer	5 min	Länge eines Records
	Messpunkte	$M_{[1 4]}$	Sub-System [1 2] (sercos III)
		$M_{[2 3]}$	Koppelkomponente [1 2] (Ethernet)
	<i>Messegerät - Beckhoff ET2000</i>		
	Genauigkeit	10 ns	Auflösung des Messgeräts

im steuerungsfernen Sub-System 2 möglich ist.

Bezüglich des physikalischen Aufbaus sind beide Koppelkomponenten statisch mit einem Abstand  $\approx 2\text{ m}$  in Sichtverbindung zueinander angeordnet. Die Messungen werden in einer Büroumgebung im 2,4-GHz-Band mit den integrierten Antennen des SK durchgeführt. Vor jeder Messung wird derjenige WLAN-Funkkanal ermittelt, für den die geringste Interferenz mit anderen Funkteilnehmern gemessen wird. Eine Auswertung der auf diese Weise bestimmten Funkcharakteristiken wurde im Zuge der Bündelfehleranalyse betrachtet (siehe Abschnitt 5.4.4.2) und zeigt eine geringe Zahl von Übertragungsfehlern auf dem Funkkanal. Im Vergleich zu einer industriellen Umgebung ist ferner festzustellen, dass in einer Büroumgebung das Spektrum prinzipiell stärker belastet ist. In einer Werkshalle wird typischerweise ein aktives Funknetz-Management in den ISM-Bändern betrieben, das bis zur expliziten Untersagung einer anderweitigen Funknetznutzung reicht (siehe Abschnitt 6.1.2). Für die Fallstudie und den zugehörigen Demonstratorsystem wird auf eine Optimierung der Antennentechnik (siehe Abschnitt 7.2.3.1.2) verzichtet, da der Aufwand für diese Maßnahmen hoch ist und die prinzipielle Machbarkeit des Ansatzes auch ohne diese Optimierungsstufe aufgezeigt werden kann. Tabelle 9.2 fasst die für die Messkampagne relevanten Parameter zusammen.

Darüber hinaus definiert der Aufbau des Demonstratorsystems gemäß Abbildung 9.2 eine Reihe von Messpunkten  $M_x$ , die zur Ermittlung der Zeitstempel-basierten Messwerte herangezogen werden. Die Messwerte selbst werden mit einem Beckhoff ET2000 Multichannel-Probe aufgezeichnet, der an die Messpunkte angeschlossen wird. Das Messgerät arbeitet in einem Cut-Through-Modus. Das heißt, das Gerät lässt Datenpakete passieren, zeichnet diese parallel auf und fügt einen 64-Bit Zeitstempel mit einer Auflösung von 10 ns hinzu. Die aufgezeichneten Tupel aus Zeitstempel und Datenpaket werden über den Engineering-Port des Messgerätes auf einem Speichermedium aufgezeichnet und stehen so offline für Auswertungen zur Verfügung.

### 9.2.2.2. Übertragungslatenz

Als erste Messgröße wird die Übertragungslatenz  $D_{SK}$  eines Datenpakets über die Funkbrücke betrachtet, die zwischen den Messpunkten  $M_2$  und  $M_3$  gemäß Abbildung 9.2 gemessen wird. Zu der Übertragungslatenz  $D_{SK}$  tragen folgende Faktoren bei:

- Verzögerungen durch externe Schnittstellen des SK wie dem RJ45-Ethernet-Connector und der IEEE-802.11n-basierten Luftschnittstelle,
- Verzögerungen durch interne Schnittstellen wie dem SDIO-Interface zwischen CPU und Peripheriekomponenten,
- Verzögerungen durch Kommunikationsprotokolle wie CSMA/CA für das Funksystem oder CSMA/CD für Fast Ethernet und
- Verzögerungen durch Interprozess-Kommunikation innerhalb des Software-Frameworks.

Abbildung 9.3 zeigt eine statistische Bewertung der Übertragungslatenz  $D_{SK}$  in Form der inversen kumulativen Verteilungsfunktion für unterschiedliche Aktualisierungszeiten  $T_{up}$ . Unabhängig von  $T_{up}$  ergibt sich für  $D_{SK}$  ein Mittelwert von  $\mu[D_{SK}] \approx 3,5$  ms, der hoch erscheint in Bezug auf die zu erwartende Übertragungsverzögerung eines Datenpakets über einen IEEE-802.11n-basierten Funkkanal. Hierzu sei zum einen auf Untersuchungen mit anderen off-the-shelf Plattformen verwiesen [142], die Verzögerungen in ähnlicher Größenordnung beobachten. Ersetzt man andererseits im Demonstratorsystem den Funkkanal durch einen Raw-Ethernet-Kanal, so liefern diese Referenzmessungen eine Übertragungsverzögerung von  $D_{SK}^{ref} \approx 0,2$  ms. Konkret wird für diese Messung der jeweils zweite Ethernet-Port der SKs genutzt, um die Koppelkomponenten miteinander zu verbinden. Mit diesem Ergebnis kann der signifikante Anteil der Verzögerung von  $D_{SK}$  der internen Anbindung des Funkmoduls, der Verarbeitung innerhalb des Funkmoduls beziehungsweise dem Funkprotokoll zugeordnet werden. Dem Funkprotokoll selbst stehen jedoch die analytischen Betrachtungen entgegen (siehe Abschnitt 5.4.1.2), womit die plattformabhängige Anbindung des Funkmoduls als primär ursächlich identifiziert werden kann - im Einklang mit [142].

Konkret stellen die Messwerte in Abbildung 9.3 die Übertragungslatenzen von Sollwerten dar, die die Antriebe im steuerungsfernen Sub-System 2 von der Steuerung in Sub-System 1 empfangen. Dazu wird die Koppelkomponente der Industrial-Ethernet-Brücke in Sub-System 1 als Funk-Master konfiguriert. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass auch die Übertragungsrichtung eines Datenpakets Einfluss auf die Übertragungslatenz  $D_{SK}$  nimmt. Für die Übertragung vom AP zum Client werden gemäß Abbildung 9.3 Mittelwerte im Bereich  $\mu[D_{SK}^{AP \rightarrow Client}] \approx 3,5$  ms bestimmt.

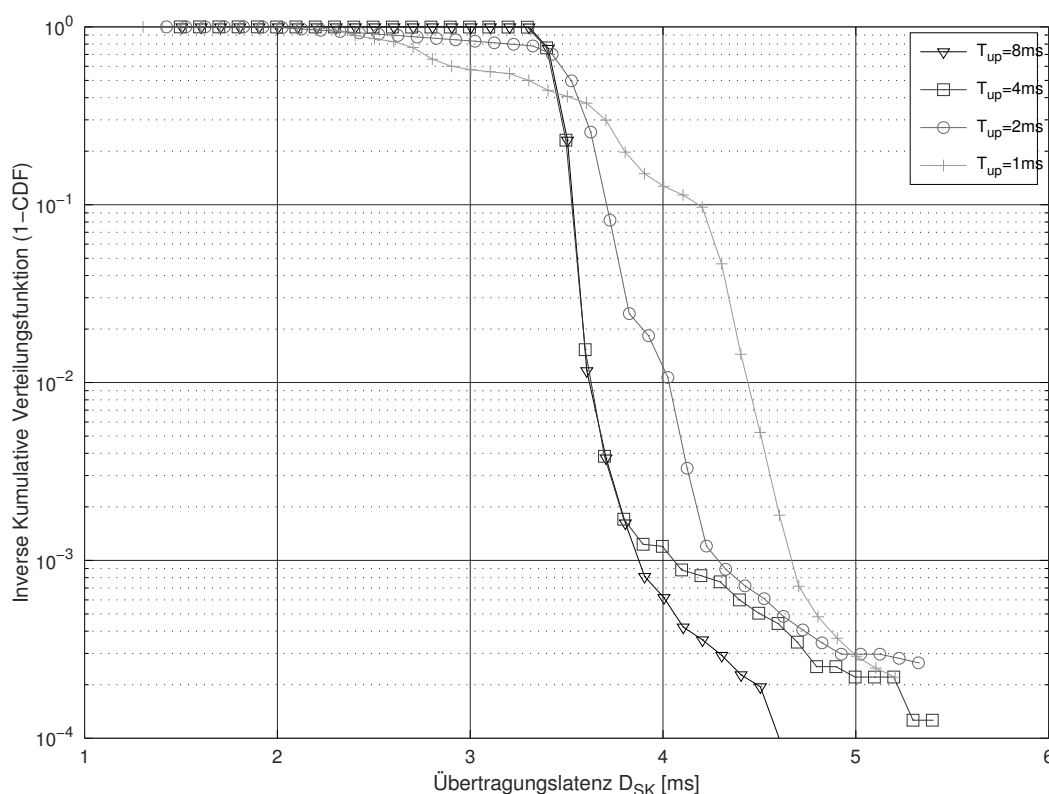


Abbildung 9.3.: Inverse kumulative Verteilungsfunktion der Übertragungslatenz  $D_{SK}$  der Funkbrücke für unterschiedliche Aktualisierungszeiten  $T_{up}$ .

Betrachtet man weiterhin die Charakteristika der inversen kumulativen Verteilungsfunktion von  $D_{SK}$  in Abbildung 9.3, so zeigen die Kurvenverläufe für die Parameter  $T_{up} = 4\text{ ms}$  und  $T_{up} = 8\text{ ms}$  bis auf die Ränder der Verteilungsfunktion vergleichbare Verläufe. Die Kurve für  $T_{up} = 1\text{ ms}$  weicht hingegen signifikant ab, was sich auch in der Standardabweichung widerspiegelt ( $\sigma[D_{SK}|_{8\text{ms}}] \approx 0,07\text{ ms}$ ,  $\sigma[D_{SK}|_{1\text{ms}}] \approx 0,63\text{ ms}$ ). Zu erklären ist diese erhöhte Standardabweichung  $\sigma[D_{SK}|_{1\text{ms}}]$  bei geringerer Aktualisierungszeit  $T_{up}$  damit, dass die gesamte Übertragungskette einer höheren Last ausgesetzt ist. Diese Last in Form von Datenpaketen muss durch die begrenzten Systemressourcen des SK verarbeitet werden. Dabei zeigt sich, dass die Übertragungskette für Aktualisierungszeiten  $T_{up} \leq 2\text{ ms}$  an Stabilität einbüßt, während bei  $T_{up} = 4\text{ ms}$  eine weitaus homogenere Verteilung für  $D_{SK}$  im Sinne einer geringeren Standardabweichung zu beobachten ist. Diese Beschränkung der Signalverarbeitungspipeline des SK zeigt sich noch deutlicher bei der Auswertung der Zwischenankunftszeit im folgenden Abschnitt 9.2.2.3.

### 9.2.2.3. Zwischenankunftszeit

Nach Betrachtung der Übertragungslatenz wird nun die Zwischenankunftszeit  $T_{ia}$  zwischen zwei aufeinanderfolgenden Datenpaketen nach Übertragung über die Funkbrücke analysiert. Gemäß Abbildung 9.2 werden für diese Messungen die Zeitstempel am Messpunkt  $M_3$  in der steuerungsfernen Koppelkomponente ausgewertet.

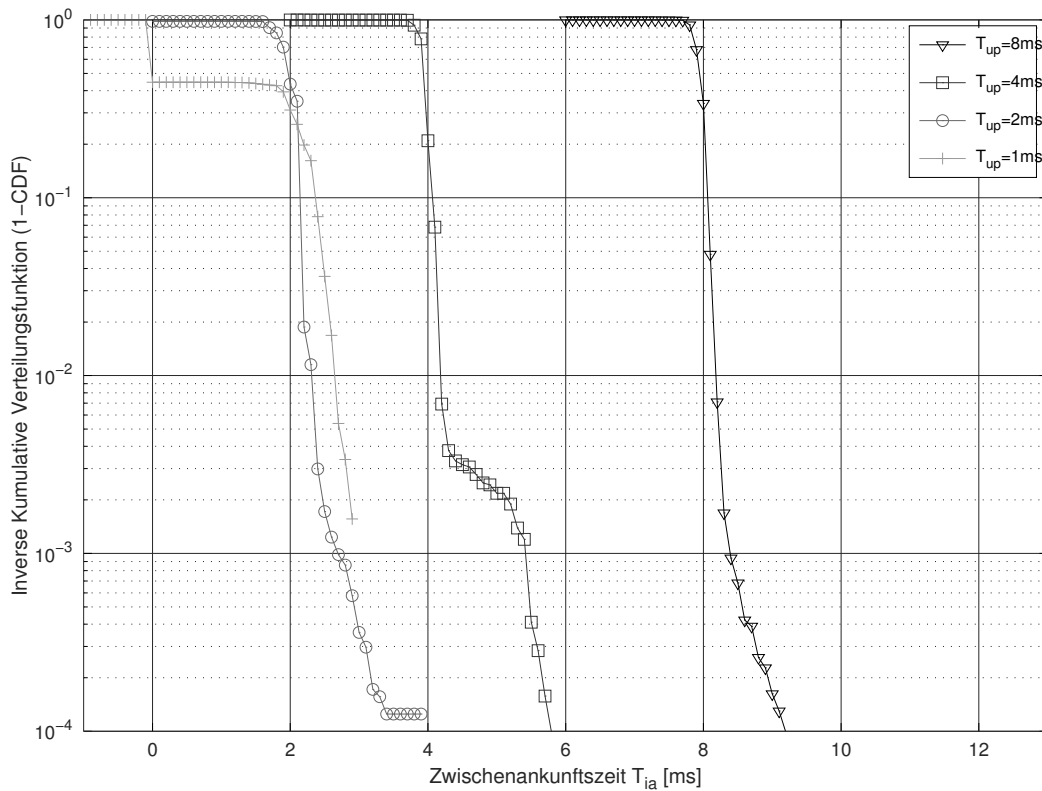


Abbildung 9.4.: Inverse kumulative Verteilungsfunktion der Zwischenankunftszeit  $T_{ia}$  der Funkbrücke für unterschiedliche Aktualisierungszeiten  $T_{up}$ .

Neuerlich zeigt Abbildung 9.4 die inverse kumulative Verteilungsfunktion der Zwischenankunftszeit  $T_{ia}$  für unterschiedliche  $T_{up}$ . Es bestätigt sich, dass das Demonstratorsystem für Aktualisierungszeiten von  $T_{up} = 1$  ms nicht die nötige Leistungsfähigkeit mit sich bringt. Gemäß Abbildung 9.4 werden  $> 50\%$  der Datenpakete mit einer Zwischenankunftszeit  $T_{ia} = 0$  ms an Messpunkt  $M_3$  registriert, was darin gründet, dass aufeinanderfolgende Datenpakete gebündelt übertragen werden, sofern ein Vorgängerpaket noch in der gleichen Stufe der Verarbeitungskette verharret, in die bereits ein neues Paket einläuft. Aus dem Verlauf der Kurve für  $T_{up} = 1$  ms zeigt sich ferner, dass die interne Verarbeitungskette des SK eine untere Schranke von 2 ms aufweist, unterhalb derer keine Datenübertragung möglich ist. Neben den mit  $T_{ia} = 0$  ms registrierten, gebündelt übertragenen Paketen weisen die verbleibenden Pakete eine Zwischenankunftszeit von  $T_{ia} \approx 2$  ms auf.

Unbenommen dieses Artefakts des Demonstratorsystems bei  $T_{up} = 1$  ms stellt der Mittelwert  $\mu[T_{ia}]$  dennoch einen guten Schätzer für die Aktualisierungszeit  $T_{up}$  dar, unabhängig vom konkreten Wert der Aktualisierungszeit. Mit dieser Eigenschaft ist eine wichtige Voraussetzung für die Wirksamkeit der Synchronisationsverfahren erfüllt, die auf der Güte der Schätzung von  $T_{up}$  beruhen. Betrachtet man die Standardabweichung der Zwischenankunftszeit, so sinkt  $\sigma[T_{ia}]$  mit steigender Aktualisierungszeit  $T_{up}$ . Tabelle 9.3 fasst die Statistiken für die Zwischenankunftszeit  $T_{ia}$  und die zuvor diskutierte Übertragungslatenz  $D_{SK}$  zusammen.

Tabelle 9.3.: Statistiken zu Übertragungslatenz und Zwischenankunftszeit.

$T_{up}$ [ms]	$\mu[D_{SK}]$ [ms]	$\sigma[D_{SK}]$ [ms]	$\mu[T_{ia}]$ [ms]	$\sigma[T_{ia}]$ [ms]
8	3,50	0,07	8,00	0,11
4	3,50	0,11	4,00	0,16
2	3,42	0,44	2,00	0,32
1	3,30	0,63	1,00	1,11

#### 9.2.2.4. Zeitlicher Versatz

Während Übertragungslatenz und Zwischenankunftszeit vorrangig die Leistungsfähigkeit der Funkbrücke beziehungsweise der Verarbeitungskette innerhalb des Demonstratorsystems qualifizieren, bewerten die Messungen des zeitlichen Versatzes zwischen den Sub-Systemen die Leistungsfähigkeit der Synchronisationsverfahren des Kommunikationssystems. Zu diesem Zweck werden gemäß Abbildung 9.2 die Zeitstempel eines Datenpakets an Messpunkt  $M_1$  im sercos-III-System von Sub-System 1 und an  $M_4$  im sercos-III-System von Sub-System 2 evaluiert.

Die Ergebnisse dieser Evaluierung finden sich in den Abschnitten zur groben Synchronisation (siehe Abbildung 7.17) und zur feinen Synchronisation (siehe Abbildung 7.19). Mit feiner Synchronisation kann der zeitliche Versatz zwischen den Sub-Systemen  $\Delta_{sub} \rightarrow 0$  nahezu vollständig kompensiert, mit grober Synchronisation gemäß Gleichung (7.29) zumindest auf  $\Delta_{sub} < \frac{T_{cyc}}{2}$  begrenzt werden.

#### 9.2.3. Bewertung

In Summe wird mit dem Demonstratorsystem in Abbildung 9.2 nachgewiesen, dass Funk-systeme und Industrial-Ethernet-basierte Systeme in einem hybriden Kommunikationssystem für industrielle Anwendungen der Feldebene prinzipiell zusammen betrieben werden können. Konkret wird eine Industrial-Ethernet-Brücke für das Industrial-Ethernet-System sercos III realisiert, in die eine IEEE-802.11n-basierte Funkbrücke mittels zweier Koppelkomponenten integriert wird. Die Koppelkomponenten werden durch eine Komposition aus sercos-III-basierten legacy Geräten (HCS01) und einem off-the-shelf Developer-Board (SK) aufgebaut.

In puncto Leistungsfähigkeit zeigt sich, dass die Übertragungsstrecke über die Industrial-Ethernet-Brücke – insbesondere derjenige Anteil der Übertragungsstrecke, der durch Verarbeitungsschritte auf dem SK ausgeführt wird – eine Übertragungslatenz von  $D_{SK} \approx 3,5$  ms erfährt. Diese Übertragungslatenz liegt bereits jenseits der Anforderung  $D_{x,n} < 2,5$  ms (siehe Tabelle 9.1). Des weiteren umfasst  $D_{SK}$  im Sinne der Latenzmodellierung der Industrial-Ethernet-Brücke nach Gleichung (7.24) nicht die gesamte resultierende Übertragungslatenz  $D_{c,N}$ , sondern nur den funkbasierten Anteil  $D_{c,N}^{s2}$  sowie Anteile für die Laufzeiten innerhalb der Koppelkomponenten  $D_{coup}$ . Andererseits sind die Anteile zur Übertragungslatenz durch das drahtgebundene sercos-III-System  $D_{c,N}^{s1|s3}$  bei den gegebenen Parametern von Leitungslänge und Paketgrößen zu vernachlässigen. Es gilt  $D_{c,N}^{s1|s3} \ll D_{SK}$ , was  $D_{SK}$  zur bestimmenden

Tabelle 9.4.: Übertragungslatenz  $D_{c,N}$  für die Datenübertragung von Sollwerten im Demonstratorsystem bei grober und feiner Synchronisation.

	$T_{up} = 8 \text{ ms}$		$T_{up} = 4 \text{ ms}$		$T_{up} = 2 \text{ ms}$	
	Fein	Grob	Fein	Grob	Fein	Grob
$D_{c,N}$ [ms]	3,5	7,5	3,5	5,5	3,5	4,5

Messgröße für die resultierende Übertragungslatenz  $D_{c,N} \approx D_{SK}$  macht.

Betrachtet man darüber hinaus den Einfluss der Synchronisation, so gilt zunächst, dass der zeitliche Versatz  $\Delta_{sub}$  ebenso in die Übertragungslatenz der Datenpakete eingeht. Im ungünstigsten Fall gilt

$$D_{c,N} \approx D_{SK} + \max(\Delta_{sub}) . \quad (9.1)$$

Im Falle der groben Synchronisation, die für die Beispielanwendung der Rundtaktmaschine als Anforderung ausreicht (siehe Tabelle 9.1), gilt für den zeitlichen Versatz entsprechend  $\max(\Delta_{sub}) = \frac{T_{up}}{2}$ . Für fein synchronisierte Sub-Systeme ist der Anteil des zeitlichen Versatzes zu vernachlässigen und aus Gleichung (9.1) resultiert  $D_{c,N} \approx D_{SK}$ .

Basierend auf Gleichung (9.1) veranschaulicht Tabelle 9.4 die resultierenden Übertragungszeiten  $D_{c,N}$  für unterschiedliche Aktualisierungszeiten  $T_{up}$  unter Berücksichtigung des Synchronisationsversatzes. Bei feiner Synchronisation entspricht demnach die Übertragungszeit  $D_{c,N}$  der gesamten Strecke dem Anteil der durch das SK verursachten Latenz  $D_{SK}$ . Bei grober Synchronisation kommt zusätzlich der im ungünstigsten Falle resultierende maximale zeitliche Versatz von  $\frac{T_{up}}{2}$  hinzu.

Damit ist festzuhalten, dass das Demonstratorsystem für Aktualisierungszeiten  $T_{up} \in [2 \text{ ms}, 4 \text{ ms}]$  bereits mehr als 50% der Dauer eines Kommunikationszyklus für die Sollwertübertragung benötigt. Unabhängig von der Art der Synchronisation gilt dann  $D_{c,N} > D_{x,n}$  für  $T_{up}$ . Erst bei einer Aktualisierungszeit  $T_{up} = 8 \text{ ms}$  und feiner Synchronisation wird mit  $D_{c,N} = 3,5 \text{ ms}$  eine Übertragungszeit erreicht, die weniger als die Hälfte der Periode für eine Übertragungsrichtung in Anspruch nimmt. Die verbleibende Hälfte des Kommunikationszyklus steht entsprechend für die Übertragungszeit der Istwerte  $D_{a,N}$  zur Verfügung. Die Anforderungen nach Tabelle 9.1 für das Fallbeispiel der Rundtaktmaschine ( $T_{up} = 5 \text{ ms}$ ,  $D_{x,n} \leq 2,5 \text{ ms}$ ) können mit dem Demonstratorsystem so nicht erfüllt werden.

## 10. Lösungsansatz mit proprietärem Funkverfahren

In diesem Kapitel wird anhand des Anwendungsbeispiels einer Verpackungsmaschine aufgezeigt, wo die Begrenzung funkbasierter Standardkomponenten für den Einsatz in hybriden industriellen Kommunikationssystemen liegt. Sobald eine Anwendung eine Vielzahl von Maschinenteilen per Funk anbindet und physikalische Mehrpunktverbindungen erforderlich sind, erweisen sich die auf Konsens und Fairness ausgelegten IEEE-802.11-basierten off-the-shelf Standardkomponenten in den ISM-Bändern als ungeeignet. In diesem Falle können lizenzgebundene Mobilfunktechnologien beziehungsweise deren grundlegende Funktionsweisen herangezogen werden, um hybride industrielle Kommunikationssysteme für physikalische Mehrpunktverbindungen zu formen [78].

Im nachfolgenden Abschnitt 10.1 wird das Fallbeispiel einer Verpackungsmaschine betrachtet, deren typische Arbeitsweise beschrieben und die daraus resultierenden Anforderungen an das Kommunikationssystem abgeleitet. Im Anschluss wird die Umsetzung des hybriden Kommunikationssystems anhand einer Simulationsstudie aufgezeigt. Darin werden zum einen die Grenzen der Leistungsfähigkeit funkbasierter Standardkomponenten ermittelt. Zum anderen wird eine verbesserte Performance mit proprietären Funkkomponenten nachgewiesen.

### 10.1. Anwendungsbeispiel Verpackungsmaschine

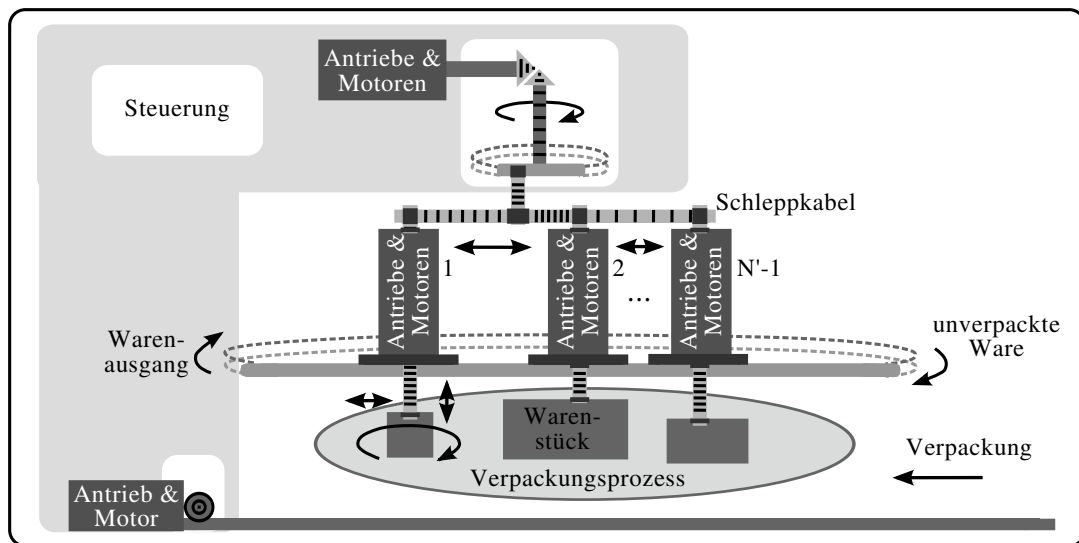
In gleicher Weise wie Rundtaktmaschinen repräsentieren Verpackungsmaschinen eine weitere Klasse von industriellen Anwendungen der Feldebene der Fertigungsautomatisierung. Innerhalb der Klasse von Verpackungsmaschinen finden sich wiederum zahlreiche konkrete Ausführungsformen, die beispielsweise von einem einfachen Umhüllen von Waren mittels Folien, dem Abfüllen von Flüssigkeiten, Versiegeln, Etikettieren oder Verpacken von Waren in Sekundärverpackungen reicht. Typische Anwender dieser Technologien sind Branchen der Medizintechnik oder der Lebensmittelindustrie.

#### 10.1.1. Eigenschaften der Anwendung

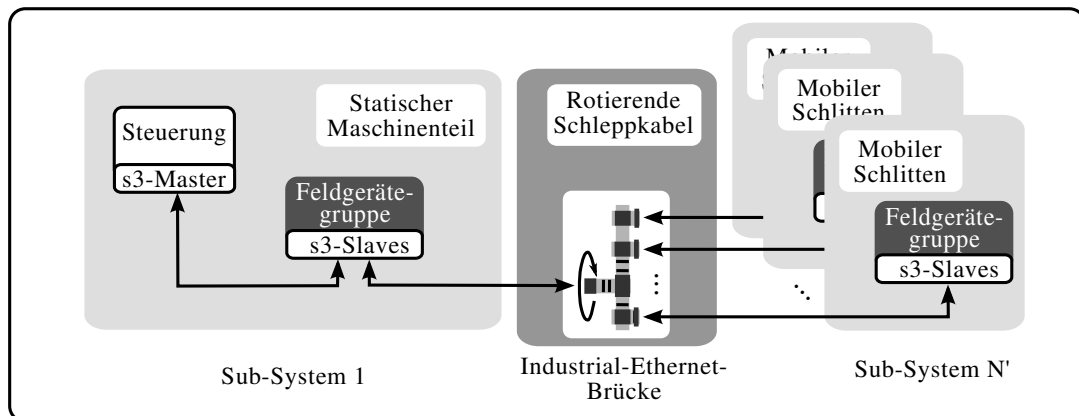
Im folgenden Fallbeispiel wird eine Maschine für Sekundärverpackungen betrachtet, deren schematischen Aufbau Abbildung 10.1a veranschaulicht. Für den Verpackungsprozess werden der Maschine einerseits unverpackte Waren und andererseits Verpackungsmaterial zugeführt. Als Arbeitsergebnis liefert die Maschine verpackte Waren in den Warenausgang.

Den Kern der Anwendung bildet die zentrale Steuerung, die den Eingang der unverpackten Ware, den Eingang des Verpackungsmaterials, den Verpackungsprozess sowie den Ausgang der verpackten Ware kontrolliert und regelt. Waren und Verpackungen kommen dabei aus unterschiedlichen Quellen zur Maschine. Gemäß Abbildung 10.1a wird der Zustrom der Verpackungen über eine lineare Bewegung realisiert, während die zu verpackenden Waren mittels





(a) Schematischer Aufbau einer Verpackungsmaschine.



(b) Modellbildung für die Verpackungsmaschine.

Abbildung 10.1.: Anwendungsbeispiel einer Verpackungsmaschine.

mobiler Schlitten auf einer kreisförmigen Umlaufbahn zugeführt werden. Die mobilen Schlitten bewegen sich auf einer festen Umlaufbahn und sind über Schleppkabel mit der zentralen Steuerung verbunden. Die Steuerung sorgt nun dafür, dass jedem der  $N' - 1$  mobilen Schlitten sein Verpackungsmaterial zugeführt wird. Damit wiederum können die Antriebsgeräte auf den mobilen Schlitten ihren Arbeitsschritt vollziehen und die eingehende Ware entsprechend verpacken. Der Verpackungsprozess selbst kann mehrere Teilschritte beinhalten und beliebig komplex ausfallen, was sich in der Anzahl der Antriebsgeräte auf den mobilen Schlitten widerspiegelt.

Ein Systemmodell der beschriebenen Verpackungsmaschine stellt Abbildung 10.1b dar. Die Steuerung und eine Feldgerätegruppe formen ein Sub-System 1, das den statischen Maschinenteil der Verpackungsmaschine repräsentiert. Das industrielle Kommunikationssystem sercos III wird über rotierende Schleppkabel geführt und verbindet so die Steuerung des statischen Maschinenteils mit den Feldgerätegruppen auf den mobilen Schlitten. Jede Feldgerätegruppe

Tabelle 10.1.: Anforderungen für das Fallbeispiel der Verpackungsmaschine.

Anforderung	Kenngröße	Wertebereich	Beschreibung
Knotenzahl	$N$	30	Gesamtzahl der Feldgeräte Anzahl mobiler Schlitten
	$N' - 1$	$\leq 5$	
Datenrate	$r_{x,n}$	24 kbps	pro Feldgerät
	$\frac{N}{N'} \cdot r_{x,n}$	120 kbps	pro Sub-System
Synchronisation	$\gamma_s, \gamma_i$ $ \Delta_{sub} $	$20 \mu s$ $\frac{T_{cyc}}{2}$	wie Rundtaktmaschine (siehe Tabelle 9.1)
Übertragungslatenz	$D_{x,n}$	2, 5 ms	
Aktualisierungszeit	$T_{up}$	5, 0 ms	

eines mobilen Schlittens wird als eigenes Sub-System modelliert.

Durch diese Modellierung kann das Konzept der Architektur des hybriden industriellen Kommunikationssystems angewendet werden. Dazu ersetzt eine Industrial-Ethernet-Brücke das drahtgebundene Teilsystem der rotierenden Schleppkabel. Die Industrial-Ethernet-Brücke spannt somit physikalische Mehrpunktverbindungen zwischen der steuerungsseitigen Koppelkomponente und den  $N' - 1$  steuerungsfernen Koppelkomponenten auf. Jeder mobile Schlitten beinhaltet eine Koppelkomponente, über deren lokalen sercos-III-Master und dessen Summenrahmenprotokoll die Feldgerätegruppe im jeweiligen Sub-System betrieben wird. Über die Industrial-Ethernet-Brücke wird schließlich die logische Geräteverbindung von der zentralen Steuerung zu allen Feldgeräten der Anwendung realisiert.

10.1.2. Resultierende Anforderungen

Ähnlich wie Schleifringe ermöglichen es auch Schleppkabel, drahtgebundene Kommunikationssysteme in industriellen Anwendungen mit mobilen Maschinenteilen einzusetzen. In vielen Fällen sind diese Lösungsansätze technisch machbar, vielmehr stellt sich jedoch die Frage nach der Wirtschaftlichkeit dieser Lösung, die unter dem Blickwinkel der Aufwände für die Installation, der Materialkosten, des Verschleißes der Bauteile und der Wartungsintervalle der Komponenten betrachtet werden müssen. Für das Fallbeispiel der Verpackungsmaschine in Abbildung 10.1 erweist sich der Einsatz von Schleppkabeln als mögliche Lösung, die allerdings mit hohen Kosten für die Wartung verbunden ist. Das gründet darin, dass Schleppkabel für den konkreten Anwendungsfall auf Rotations- und Torsionskräfte beansprucht werden, wofür sie, insbesondere die datenführenden Industrial-Ethernet-Leitungsbahnen, nicht ausgelegt sind. Eine Entkoppelung von Daten- und Leistungsübertragung erweist sich daher als wirtschaftlicher Lösungsansatz für das industrielle Kommunikationssystem.

Tabelle 10.1 fasst die resultierenden Anforderungen für das Fallbeispiel der Verpackungsmaschine und ihr industrielles Kommunikationssystem zusammen. Im Bezug auf die Anforderungen an die zeitlichen Kenngrößen wie Synchronisation und Übertragungslatenzen gelten für die Verpackungsmaschine die gleichen Anforderungen wie für das Beispiel der Rundtaktmaschine. Zwischen den mobilen Schlitten ist demnach eine lose Kopplung im Sinne grober zeitlicher Synchronisation ausreichend, während die Feldgeräte innerhalb des Sub-

Systems eines mobilen Schlittens fein synchronisiert arbeiten müssen.

Die Anzahl  $N$  der Feldgeräte beziehungsweise die Anzahl der mobilen Schlitten  $N'$  einer Maschine hängt schlicht von der Größe der Maschine ab und ist für den Anwender eine Frage der Wirtschaftlichkeit, die an die Frage gekoppelt ist, wie hoch der Warendurchlauf sein muss und welcher Preis für eine entsprechende Maschinengröße entsteht. Die in Tabelle 10.1 gelisteten Parameter stellen einen wirtschaftlichen Kompromiss für eine mittelgroße Verpackungsmaschine dar, die bei einem Verpackungszyklus der Maschine von fünf Sekunden bei  $N' - 1 = 5$  mobilen Schlitten insgesamt 60 Warenteile pro Minute verpacken kann.

Betrachtet man den Datenratenbedarf der Anwendung, so ergibt sich für das Funksystem, das die Feldgeräte der steuerungsfernen Sub-Systeme auf den mobilen Schlitten mit der zentralen Steuerung verbindet, eine akkumulierte Datenrate pro Übertragungsrichtung von  $\frac{N(N'-1)}{N'} \cdot r_{x,n} = 600 \text{ kbps}$ . Diesem Wert liegt die Annahme einer Gleichverteilung der Feldgeräte pro Sub-System zugrunde. Aus der akkumulierten Datenrate lässt sich schließlich gemäß Heuristik nach Gleichung (7.9) die erforderliche Systemkapazität  $R_{peak} > 4,2 \text{ Mbps}$  des Funksystems ableiten.

In Summe ähneln sich damit die resultierenden Anforderungen der Anwendungsbeispiele der Verpackungs- und der Rundtaktmaschine im Hinblick auf zeitliche Kenngrößen, Datenraten und der Anzahl der eingesetzten Feldgeräte. Zuvorderst die Anzahl der Sub-Systeme  $N'$  unterscheidet die beiden Anwendungsbeispiele. Allein dies reicht hingegen aus, die Machbarkeit hybrider Kommunikationssysteme für den Anwendungsfall der Verpackungsmaschine zu hinterfragen, da funkbasierte Teilsysteme bestehend aus Standardkomponenten nicht uneingeschränkt die nötige Leistungsfähigkeit für physikalische Mehrpunktverbindungen bieten.

## 10.2. Umsetzung mit Simulationsstudie

Die Leistungsfähigkeit des hybriden Kommunikationssystems für das Anwendungsbeispiel der Verpackungsmaschine wird mittels einer Simulationsstudie bewertet. Zunächst werden in Abschnitt 10.2.1 Zielstellung und Modellierung für die Simulationsstudie erläutert. Die Simulationsergebnisse werden in Abschnitt 10.2.2 diskutiert, bevor in Abschnitt 10.2.3 eine abschließende Bewertung der Simulationsstudie erfolgt.

### 10.2.1. Simulationsstudie

Für die Studie kommt das Simulationswerkzeug *OMNet++* zum Einsatz [143]. Im Kern steht mit diesem Werkzeug ein Framework für ereignisorientierte Simulationen – Discrete Event Simulation (DES) – zur Verfügung. Mit diesem Simulationsansatz lässt sich die Problemstellung des wettbewerbsorientierten Medienzugriffs laufzeiteffizient auf Rechenmaschinen abbilden. Eine detaillierte Beschreibung zur Verwendung des Simulationswerkzeugs sowie zur Modellierung der Systemkomponenten – speziell für das CSMA/CA-basierte Medienzugriffsverfahren nach IEEE 802.11 – ist Gegenstand von Abschnitt 10.2.1.2.

#### 10.2.1.1. Zielstellung

Mit der Simulationsstudie werden folgende Sachverhalte vertiefend untersucht:

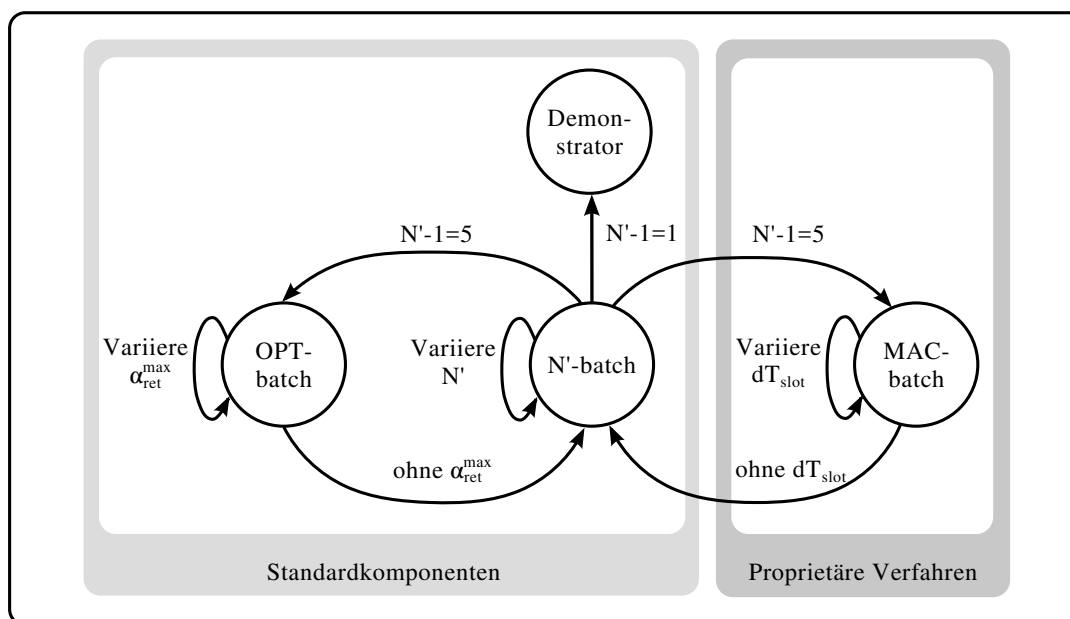


Abbildung 10.2.: Überblick zu den Simulationsläufen – Batches – der Studie.

- Zum einen werden die *Grenzen der Leistungsfähigkeit funkbasierter Standardkomponenten* für den Einsatz in hybriden industriellen Kommunikationssystemen bestimmt. Als Ausgangspunkt dient ein Simulationsmodell für das Demonstratorsystem. Dieses Modell wird von einer physikalischen Einzelpunktverbindung auf Mehrpunktverbindungen erweitert. Darüber hinaus wird in diesem Kontext betrachtet, wie sich eine obere Schranke für die Anzahl von Paketwiederholungen auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems auswirkt.
- Zum anderen werden mit der Studie *Eigenschaften von Funktechnologien* bestimmt, die diese für den *Einsatz in hybriden industriellen Kommunikationssystemen qualifizieren*. Hierbei wird insbesondere das Medienzugriffsverfahren des Funksystems betrachtet. Dabei wird die Frage adressiert, welche Auswirkungen sich für die Echtzeitfähigkeit des Gesamtsystems ergeben, wenn das Medienzugriffsschema schrittweise von einem wettbewerbsorientierten in ein deterministisches Schema überführt wird.

Zur Evaluierung folgt die Simulationsstudie einer Strategie, die Abbildung 10.2 veranschaulicht. Als Referenz dient das Demonstratorsystem, das mit funkbasierten Standardkomponenten über eine physikalische Einzelpunktverbindung ein einzelnes  $N' - 1 = 1$ , steuerungsfernes Sub-System anbindet. Basierend auf dieser Referenz wird in einem ersten Simulationslauf – dem  $N'$ -Batch in Abbildung 10.2 – die Anzahl  $N'$  der Sub-Systeme variiert.

Ausgangspunkt für die weiteren Simulationsläufe ist eine feste Anzahl  $N' - 1 = 5$  steuerungsferner Sub-Systeme. Diese Festlegung motiviert sich aus den Anforderungen der Fallstudie der Verpackungsmaschine. Zunächst wird im *OPT*-Batch betrachtet, wie ein auf funkbasierten Standardkomponenten aufgebautes Kommunikationssystem optimiert werden kann. Von den in Abschnitt 7.2.3 diskutierten Maßnahmen zur Optimierung wird auf die Strategie des präventiven Verwerfens von Datenpaketen fokussiert, indem eine maximale Anzahl  $\alpha_{ret}^{max}$  von Paketwiederholungen für den sendenden Funkteilnehmer festgelegt wird.

In einem weiteren Simulationslauf – dem *MAC-Batch* – wird das CSMA/CA-basierte Medienzugriffsverfahren der funkbasierten Standardkomponente erweitert und in ein Zeitschlitz-basiertes proprietäres Verfahren überführt. Hierzu wird der Parameter  $dT_{slot}$  eingeführt, der die Dauer des Zeitschlitzes festlegt, der einem Funkteilnehmer exklusiv zur Verfügung steht.

Zur Auswertung der Simulationen wird die Übertragungslatenz  $D_{a,N}$  der Istwertübertragung herangezogen, die für ein Datenpaket von einem steuerungsfernen Sender zum steuerungsseitigen Empfänger am SAP zwischen Kommunikations- und Anwendungsschicht bestimmt wird. Im weiteren wird die Anzahl der Paketwiederholungen  $\alpha_{ret}$  ermittelt, die ein Funkteilnehmer gegebenenfalls benötigt, um ein Datenpaket in einem wettbewerbsorientierten Medienzugriffsverfahren erfolgreich zu übertragen. Schließlich wird die Paketverlustrate *PLR* im Sinne von harter Echtzeit gemessen. Das heißt eine Paketübertragung ist nur dann erfolgreich, wenn ein Datenpaket innerhalb der vorgegeben zeitlichen Schranke beim Empfänger eintrifft, sonst gilt das Paket als verloren.

### 10.2.1.2. Simulationsmodell

Für die Simulationsstudie wird die Istwertübertragung betrachtet, bei der die Feldgeräte der steuerungsfernen Sub-Systeme Daten ihrer Sensoren oder Geberkomponenten an die zentrale Steuerung übermitteln. Für die Funkbrücke stellt diese Übertragungsrichtung die kritischere Strecke dar, da alle Funkkomponenten der Sub-Systeme zeitgleich ihre Datenpakete übertragen, was insbesondere für den wettbewerbsorientierten Medienzugriff eine Herausforderung darstellt.

Abbildung 10.3 zeigt das Simulationsmodell der Istwertübertragung in der grafischen Benutzeroberfläche von *OMNet++*. Der Funkkanal ( $w\_medium$ ) verbindet die  $N' - 1$  steuerungsfernen Sub-Systeme mit dem steuerungsseitigen Sub-System. Dort nimmt die zentrale Steuerung, genauer gesagt ihre sercos-III-basierte Kommunikationsschnittstelle, die übertragenen Istwerte der Sensoren auf. Im Modell stellt die Steuerung damit eine Datensenke ( $s3\_sink$ ) für die Istwertübertragung dar. Die Datensenke ihrerseits wird von der funkbasierten Komponente der steuerungsseitigen Koppelkomponente, die in dem Simulationsmodell durch einen Funkempfänger ( $gw\_rx$ ) modelliert wird, mit Daten gespeist. Als Datenquelle ( $s3\_source$ ) für die Istwerte werden die Sensoren durch ihre sercos-III-basierte Kommunikationsschnittstelle repräsentiert, für die zyklisch mit der Periode der Aktualisierungszeit  $T_{up}$  der Anwendung Sensorwerte erzeugt werden. Diese Sensorwerte werden als Datenpakete an den Funksender ( $gw\_tx$ ) übermittelt, der wiederum versucht, diese über den Funkkanal zum Funkempfänger zu übertragen. Im Simulationsmodell werden die  $N' - 1$  steuerungsfernen Sub-Systeme durch je eine Komponente für Datenquelle und Funksender realisiert, wobei die  $N' - 1$  Funksender durch Instanzen der (*numConnections*) Funksender repräsentiert werden.

Im Zentrum des Simulationsmodells steht die Kombination aus Funkkanal ( $w\_medium$ ), Funksender ( $gw\_tx$ ), sowie der Schnittstelle zwischen den beiden Komponenten. Mit dieser Komposition wird der CSMA/CA-basierte Medienzugriff des Funksystems modelliert. Es sei angemerkt, dass *OMNet++* ausschließlich als Simulationsframework genutzt wird. Für die Modellierung der Komponenten werden keine weiteren Bibliotheken eingebunden.

Für die weiteren Betrachtungen wird angenommen, dass der Funkkanal frei von Übertragungsfehlern ist. Der Fokus verbleibt damit ausschließlich auf der Wirkweise des Medienzugriffs und nicht auf Maßnahmen zur Erhöhung der Robustheit. Andererseits wird für die Istwertüber-

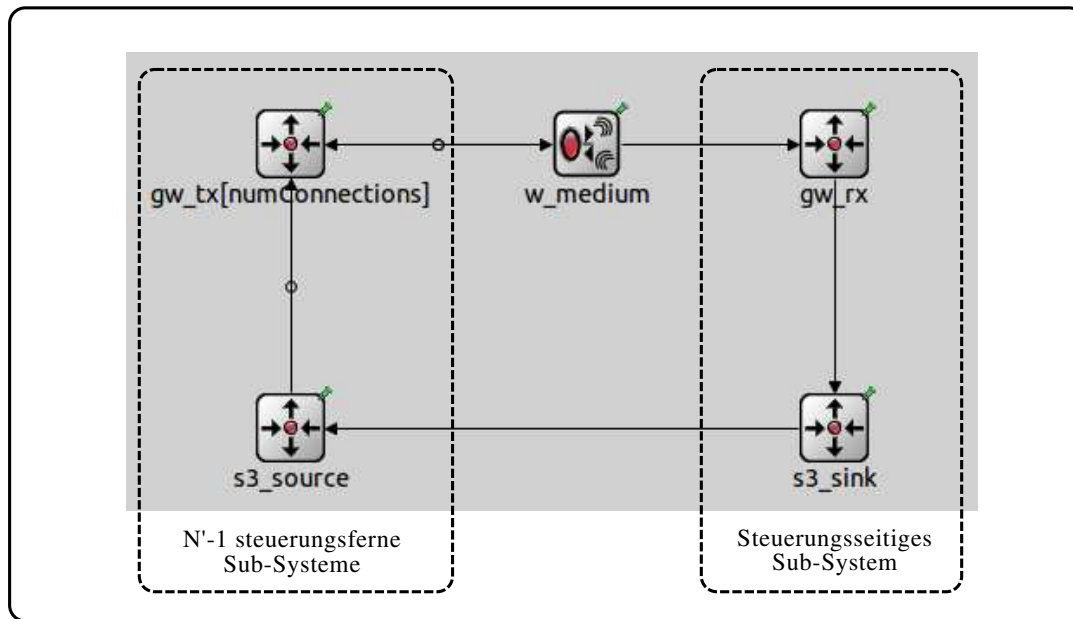


Abbildung 10.3.: Simulationsmodell der Istwertübertragung.

tragung diejenige Last auf dem Funkkanal berücksichtigt, die die Sollwertübertragung für die Übertragungsstrecke im Halbduplex-Modus mitbringt. Konkret sieht das Simulationsmodell hierfür eine Last von 25% für die Sollwertübertragung vor.

### 10.2.2. Ergebnisse

Basierend auf dem Simulationsmodell der Istwertübertragung erörtern die nachfolgenden Abschnitte die Ergebnisse für die drei Simulationsläufe  $N'$ -Batch,  $OPT$ -Batch und  $MAC$ -Batch. Weiterhin gelten für die Simulation folgende Annahmen und Randbedingungen:

- Aktualisierungszeit der Anwendung: Im Simulationsmodell entspricht die Aktualisierungszeit der Periode der Datenerzeugung durch die Datenquelle ( $s3\_source$ ). Alle Simulationsläufe generieren Anwendungsdaten mit einer Aktualisierungszeit von  $T_{up} = 2$  ms.
- Fokus auf Istwertübertragung: Die Sollwertübertragung geht als externe Last für den Funkkanal in die Simulation ein. Es wird eine Last von 25% angesetzt, was sich daraus motiviert, dass die Sollwertübertragung von einem Funk-Master zu mehreren Funk-Slaves als Broadcast und somit effizienter als die Istwertübertragung realisiert werden kann. Für die Istwertübertragung stehen entsprechend 75% der Übertragungskapazität zur Verfügung.
- Ideale Funkübertragung: Außer den Konflikten um den Wettbewerb um das Funkmedium wird für die Simulationsläufe eine ideale Übertragung angenommen. Es werden keine zusätzlichen Übertragungsfehler auf der Funkstrecke berücksichtigt. Diese Annahme motiviert sich aus den charakteristischen Mobilitätsanforderungen industrieller Anwendungen der Feldebene, für die bereits Maßnahmen hinsichtlich einer robusten Funkübertragung aufgezeigt wurden.

- Auswertung für Übertragungslatenz: Für die statistische Auswertung der Übertragungslatenz  $D_{a,N}$  werden alle Messwerte herangezogen. Dies gilt auch, wenn ein Datenpaket das Kriterium der harten Echtzeit verletzt, das heißt  $D_{a,N} > T_{up}$ .
- Auswertung für Paketverlustrate: In die Paketverlustrate  $PLR$  fließen zum einen im Sinne harter Echtzeit zu spät empfangene Datenpakete  $D_{a,N} > T_{up}$  ein. Zum anderen werden Datenpakete berücksichtigt, die sendeseitig verworfen werden, wenn beispielsweise bereits zu diesem Zeitpunkt abzusehen ist, dass ein Datenpaket nicht innerhalb seiner Echtzeitschranke zugestellt werden kann.

Jeder Simulationslauf erstreckt sich über eine Zeitspanne von 1000s, was bei einer Aktualisierungszeit von  $T_{up} = 2\text{ ms}$  einer Anzahl von  $5 \cdot 10^5$  Kommunikationszyklen entspricht. Je nach Anzahl  $N' - 1$  der steuerungsfernen Sub-Systeme resultiert dies in  $5 \cdot 10^5 \cdot (N' - 1)$  Datenpaketen pro Parametereinstellung eines jeden Simulationslaufs.

### 10.2.2.1. $N'$ -Batch

In einem ersten Simulationslauf  $N'$ -Batch wird die Istwertübertragung des hybriden industriellen Kommunikationssystems mit einer Funkbrücke aus funkbasierten Standardkomponenten betrachtet. In Anlehnung an das Demonstratorsystem mit seiner IEEE-802.11n-basierten Funkstrecke wird CSMA/CA als Medienzugriffsverfahren verwendet. Im Simulationslauf wird nun die Anzahl der Sub-Systeme  $N'$  variiert.

Abbildung 10.4 stellt die inverse kumulative Verteilungsfunktion der Übertragungslatenz  $D_{a,n}$  der Istwertübertragung für eine variable Anzahl steuerungsferner Sub-Systeme  $N' - 1$  dar. Qualitativ ist festzustellen, dass die mittlere Übertragungslatenz für Datenpakete steigt, wenn sich die Anzahl  $N' - 1$  der Sub-Systeme erhöht. Konkret ergibt sich für  $N' - 1 = 2$  steuerungsferne Sub-Systeme, dass ein Datenpaket, das über die Funkbrücke übertragen wird, eine zeitliche Schranke von 0,5 ms mit einer Wahrscheinlichkeit von  $P(D_{a,n} > 0,5\text{ ms}) \approx 0,01$  überschreitet. Im Umkehrschluss ergibt sich  $P(D_{a,n} \leq 0,5\text{ ms}) \approx 0,99$ , das heißt 99% der übertragenen Datenpakete erreichen die zentrale Steuerung mit einer Übertragungslatenz von 0,5 ms oder weniger. Erhöht man die Zahl der Sub-Systeme, so gilt für  $N' - 1 = 3$  entsprechend  $P(D_{a,n} \leq 0,9\text{ ms}) \approx 0,99$ .

Erhöht man die Anzahl  $N' - 1$  steuerungsferner Sub-Systeme weiter, so können selbst hohe Übertragungslatenzen schwerlich zugesichert werden. Für  $N' - 1 = 5$  ergibt sich gemäß Abbildung 10.4  $P(D_{a,n} \leq 1,5\text{ ms}) \approx 0,03$  und für  $N' - 1 = 10$  gar  $P(D_{a,n} \leq 1,5\text{ ms}) \approx 0,13$ . Der Grund hierfür liegt im CSMA/CA-basierten Wettbewerb und der Selbstinterferenz der Funksender, die mit steigendem  $N'$  in zunehmenden Konflikten auf dem Übertragungsmedium resultieren, sodass Datenpakete gar nicht mehr übertragen werden können. Die auslaufenden Kurvenverläufe der Verteilungsfunktion im Wertebereich  $D_{a,n} > 1,5\text{ ms}$  veranschaulichen dies in Abbildung 10.4.

Darüber hinaus generiert gemäß Simulationsmodell die Sollwertübertragung eine Last von 25%. Bezogen auf die Aktualisierungszeit von  $T_{up} = 2\text{ ms}$  sind für die Sollwertübertragung somit 0,5 ms reserviert – für die Istwertübertragung verbleiben 1,5 ms. Im Simulationsmodell wird die Sollwertübertragung dahingehend berücksichtigt, als dass das Übertragungsmedium in dieser Zeitspanne als blockiert betrachtet wird, sofern ein Sendeversuch unternommen wird.

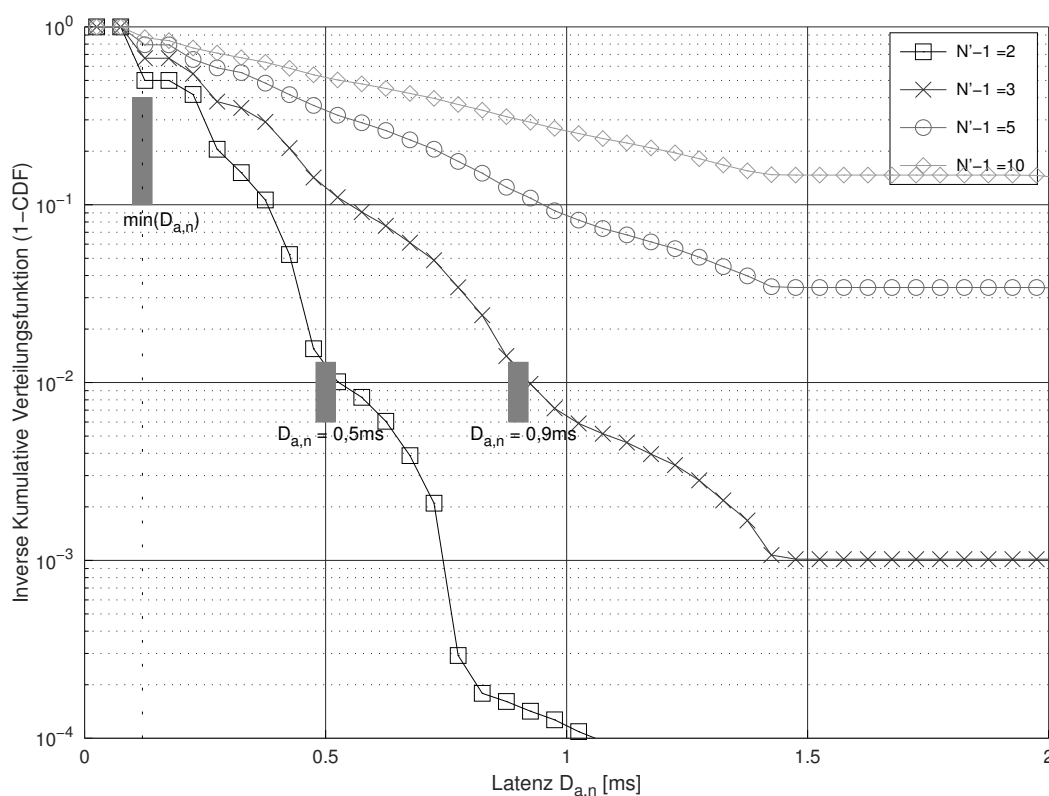


Abbildung 10.4.: Inverse kumulative Verteilungsfunktion der Übertragungslatenz  $D_{a,n}$  für unterschiedliche Anzahl steuerungsferner Sub-Systeme  $N' - 1$ .

Eine bereits begonnene Istwertübertragung wird durch die Sollwertübertragung gestört und muss wiederholt werden, was bezüglich der Echtzeitschranke wenig sinnvoll ist. Daher gilt ein Datenpaket als verloren, das nicht innerhalb des aktuellen Zeitfensters der Istwertübertragung zugestellt werden kann.

Aus Abbildung 10.4 kann ferner die minimale Übertragungslatenz  $\min(D_{a,n}) = 0,12$  ms ermittelt werden. Sie ergibt sich, wenn ein Datenpaket ohne Verzögerung übertragen wird. Zu der festen unteren Schranke  $\min(D_{a,n})$  tragen die Verzögerungen durch Übertragungsrate, Gerätedurchlaufzeit und Verarbeitungszeiten der Komponenten bei, die sich im Simulationsmodell zu 0,12 ms akkumulieren. Betrachtet man den Sonderfall  $N' - 1 = 1$ , so ergibt sich  $P(D_{a,n} \leq 0,12 \text{ ms}) = 100\%$ . Alle Datenpakete der Istwertübertragung werden um den festen Wert  $\min(D_{a,n}) = 0,12$  ms verzögert, da einerseits der Wettbewerb zwischen den Sendern um das Medium entfällt und andererseits keine Übertragungsfehler auftreten.

Für den Sonderfall  $N' - 1 = 1$  erfolgt der Medienzugriff demnach deterministisch. Für  $N' - 1 \geq 2$  hingegen versuchen mehrere Funk-Slaves der steuerungsfernen Sub-Systeme zeitgleich Datenpakete zu übertragen. In Folge dessen kommt es zwischen den Sendern zum Wettbewerb, und das CSMA/CA-basierte Medienzugriffsverfahren führt zufällige Wartezeiten bei Paketwiederholungen ein. Beispielsweise sind bei  $N' - 1 = 2$  steuerungsfernen Sub-Systemen zwei Datenpakete pro Aktualisierungszeit  $T_{up} = 2$  ms über die Funkstrecke zu übertragen. Stets gewinnt ein Sender für sein Datenpaket den Wettbewerb um das Medium.



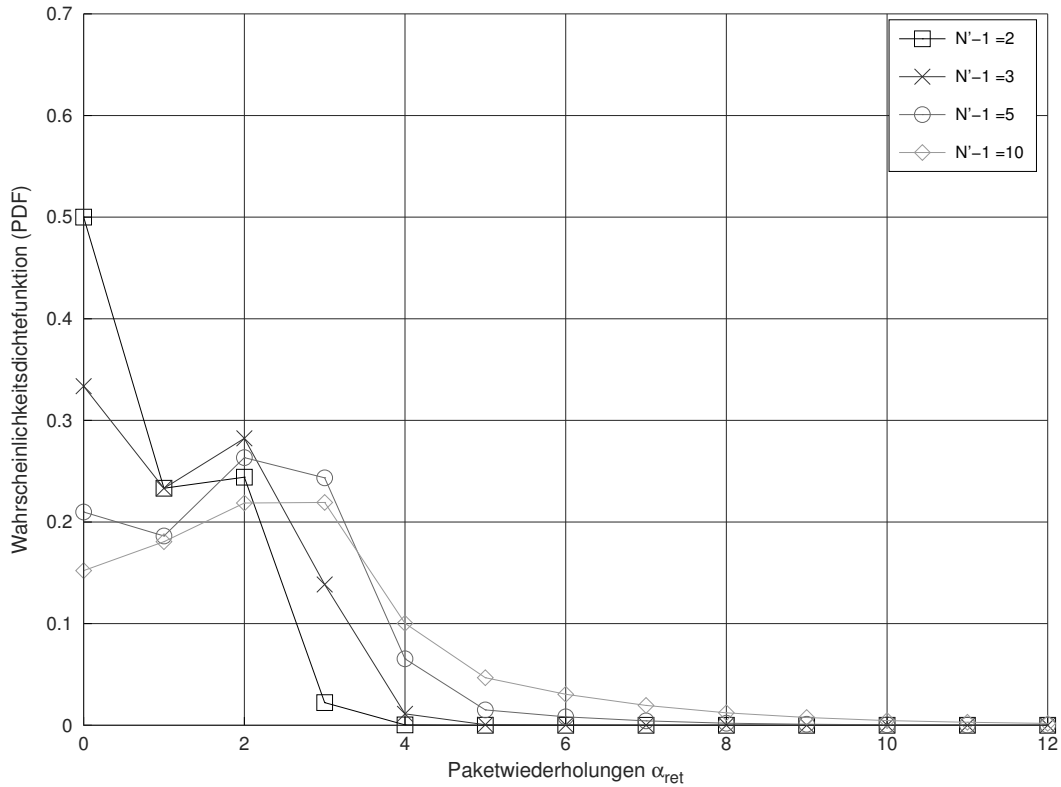


Abbildung 10.5.: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Paketwiederholungen  $\alpha_{ret}$  für unterschiedliche Anzahl steuerungsferner Sub-Systeme  $N' - 1$ .

Für  $N' - 1 = 2$  ergibt sich dann  $P(D_{a,n} \leq 0,12\text{ms}) = 50\%$ . Allgemein gilt für das vorliegende Simulationsmodell entsprechend  $P(D_{a,n} \leq 0,12\text{ms}) \approx \frac{1}{N'-1}$ , was ebenso mit Abbildung 10.4 veranschaulicht ist.

Schlägt ein erster Sendeversuch für ein Datenpaket fehl, so löst das CSMA/CA-basierte Medienzugriffsverfahren für Paketwiederholungen durch seine zufälligen Wartezeiten den Wettbewerbskonflikt um das Medium auf. Abbildung 10.5 stellt in diesem Zusammenhang die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Paketwiederholungen für eine variable Anzahl  $N' - 1$  steuerungsferner Sub-Systeme dar. Entsprechend der Ergebnisse für die resultierende Übertragungslatenz nimmt auch die Anzahl der Paketwiederholungen  $\alpha_{ret}$  mit der Anzahl der steuerungsfernen Sub-Systeme  $N' - 1$  zu. Für  $N' - 1 = 2$  werden 50% der Datenpakete im ersten Sendeversuch ohne Paketwiederholung zugestellt. Schließlich sind nach der vierten Paketwiederholung alle Datenpakete übertragen.

Steigt die Anzahl der Sub-Systeme, so sinkt die Anzahl erfolgreicher Paketzustellungen im ersten Sendeversuch und Paketwiederholungen werden benötigt. Zur Untersuchung der Wirkweise des wettbewerbsorientierten Medienzugriffsverfahrens ist in diesem Simulationslauf die Anzahl für Paketwiederholungen  $\alpha_{ret}$  unbegrenzt, obwohl gegebenenfalls die Echtzeitschranke für die Übertragungslatenz verletzt wird. Qualitativ zeigt die Charakteristik der Kurvenverläufe in Abbildung 10.5, dass die Anzahl der Paketwiederholungen bei geringer Anzahl von Sub-Systemen  $N' - 1 = \{2, 3\}$  annähernd vorhersagbar bleibt, während mit

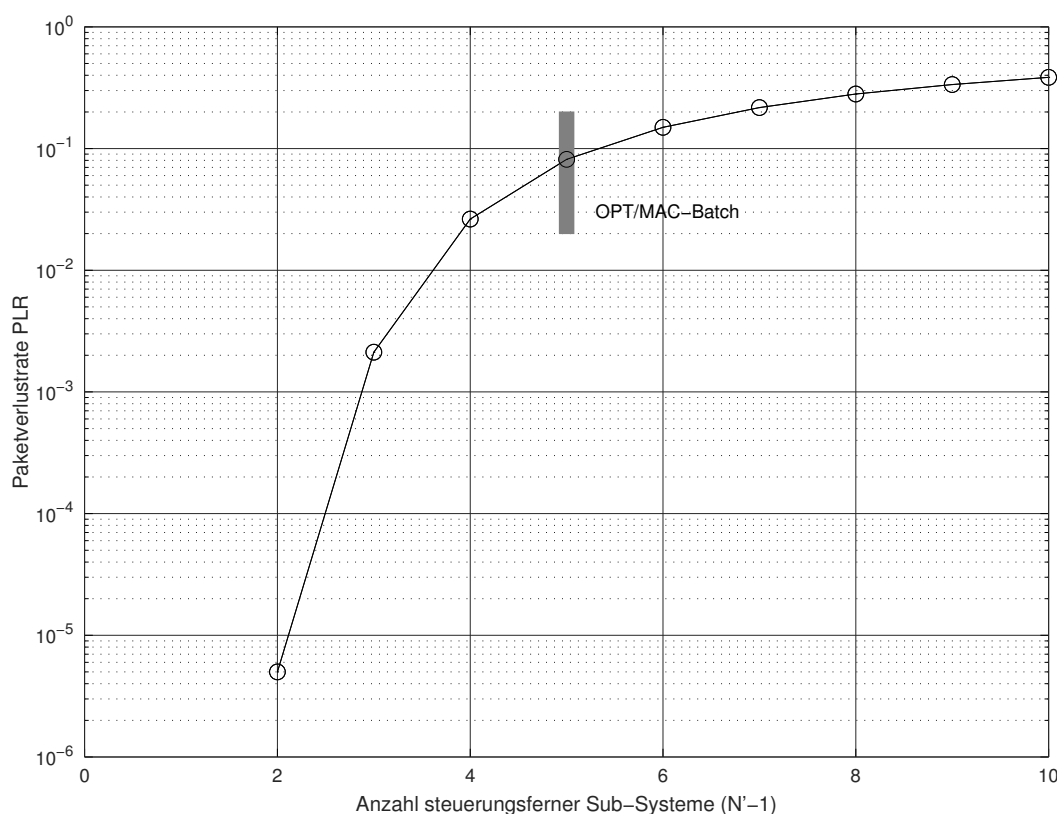


Abbildung 10.6.: Paketverlustrate  $PLR$  über Anzahl steuerungsferner Sub-Systeme  $N' - 1$ .

steigender Anzahl von Sub-Systemen die Varianz für die Paketwiederholungen zunimmt, was die Vorhersagbarkeit im Sinne einer deterministischen Datenübertragung erschwert.

Nach Auswertung der Paketwiederholungen wird im folgenden die Paketverlustrate  $PLR$  der Istwertübertragung betrachtet, wozu Abbildung 10.6 die  $PLR$  über der Anzahl  $N' - 1$  steuerungsferner Sub-Systeme darstellt. Nur bei einer geringen Anzahl von Sub-Systemen  $N' - 1 = \{2, 3\}$  kann die Paketverlustrate unter einer Schranke von  $PLR < 1\%$  gehalten werden. In Anbetracht der Annahme, dass keine Übertragungsfehler auf dem Funkkanal einfließen, gründet diese Performance ausschließlich in der Wirkweise des wettbewerbsorientierten Medienzugriffsverfahrens. Dies führt zu Zugriffskonflikten, die durch zufällige Wartezeiten aufgelöst werden. Infolgedessen kann die Übertragungslatenz eines Datenpakets derart anwachsen, dass eine anwendungsseitige Echtzeitschranke gerissen und ein Datenpaket als verlustig gewertet wird.

Des weiteren hebt Abbildung 10.6 durch den grau unterlegten Bereich bei  $N' - 1 = 5$  Sub-Systemen den Arbeitsbereich hervor, der für die im folgenden diskutierten Simulationsläufe *OPT*- und *MAC*-Batch als Ausgangspunkt und Referenz dient.

#### 10.2.2.2. *OPT*-Batch

Für den Simulationslauf *OPT*-Batch wird zunächst die Anzahl der steuerungsfernen Sub-Systeme auf  $N' - 1 = 5$  gesetzt, was den Anforderungen des Anwendungsbeispiels der

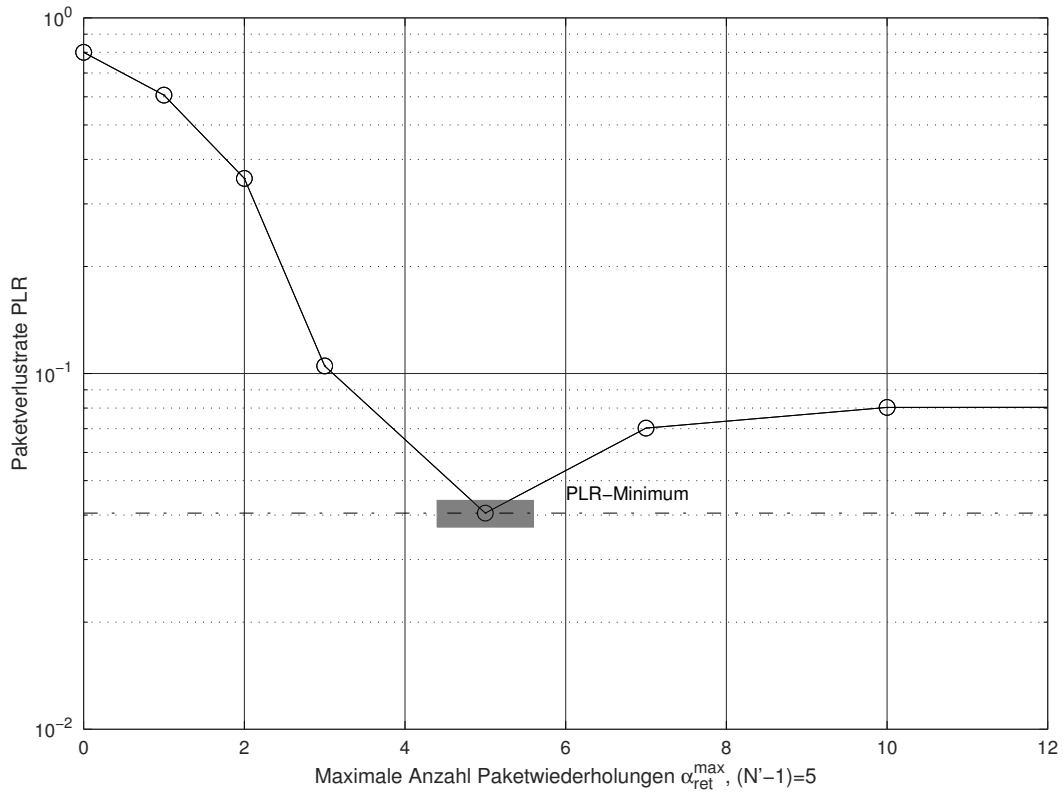


Abbildung 10.7.: Paketverlustrate  $PLR$  über der maximalen Anzahl von Paketwiederholungen  $\alpha_{ret}^{max}$  für  $N' - 1 = 5$ .

Verpackungsmaschine entspricht. Dann wird für jeden Funksender der steuerungsfernen Sub-Systeme der Parameter  $\alpha_{ret}^{max}$  gesetzt, der eine obere Schranke für Paketwiederholungen darstellt. Für den  $N'$ -Batch wurde dieser Parameter nicht gesetzt, sodass gilt  $\alpha_{ret}^{max} \rightarrow \infty$ .

Ist beim Sendeversuch eines Datenpakets der Funkkanal belegt, so wird die Übertragung des Datenpakets seitens des Funksenders zurückgestellt und wiederholt. Dies geschieht nach den Regeln von CSMA/CA, das für Paketwiederholungen eine zufällige Wartezeit nach Gleichung (5.5) berücksichtigt. Die Anzahl der Paketwiederholungen  $\alpha_{ret}$  wird in diesem  $OPT$ -Batch nun durch  $\alpha_{ret}^{max}$  begrenzt, womit ältere – wahrscheinlich ohnehin bereits verspätete – Datenpakete früher aus der Übertragungsstrecke herausgefiltert werden können. Entsprechend steht anderen Datenpaketen mehr Bandbreite zur Verfügung.

Abbildung 10.7 veranschaulicht, wie sich für die Istwertübertragung die Paketverlustrate  $PLR$  über der maximalen Anzahl von Paketwiederholungen  $\alpha_{ret}^{max}$  verändert. Ohne Begrenzung der Paketwiederholungen wird gemäß Abbildung 10.6 eine Verlustrate von  $PLR \approx 8\%$  erzielt, was gut mit der  $PLR$  für  $\alpha_{ret}^{max} = 10$  in Abbildung 10.7 übereinstimmt. Für  $\alpha_{ret}^{max} = 0$  wird mit  $PLR \approx 80\%$  die höchste Paketverlustrate registriert. Dies gründet darin, dass die Funksender aller  $N' - 1$  steuerungsfernen Sub-Systeme zeitgleich in den Wettbewerb um die Datenübertragung ihres Datenpakets eintreten und für ihren ersten Sendeveruch bei freiem Übertragungsmedium im Sinne des IEEE-802.11-basierten CSMA/CA keinen weiteren zufälligen Backoff vorsehen. Den Wettbewerb kann nur ein Funkteilnehmer gewinnen, womit

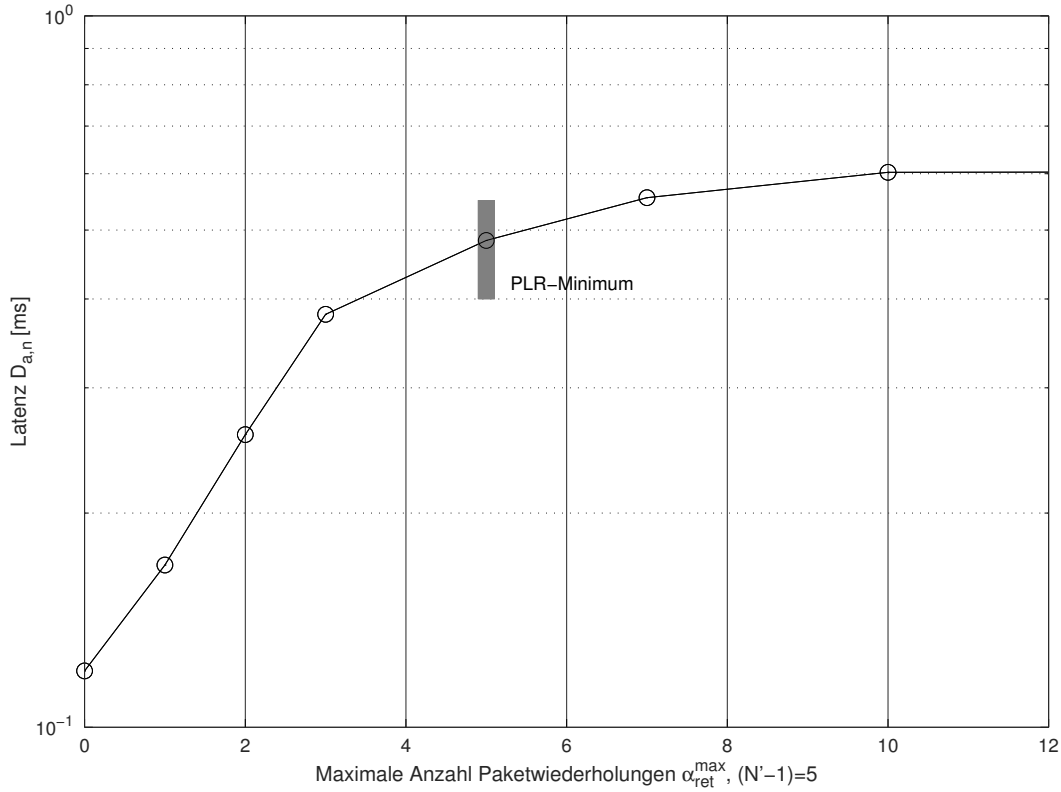


Abbildung 10.8.: Übertragungslatenz  $D_{a,n}$  über der maximalen Anzahl von Paketwiederholungen  $\alpha_{ret}^{max}$  für  $N' - 1 = 5$ .

sich ohne Paketwiederholungen  $\alpha_{ret}^{max} = 0$  eine Paketverlustrate von  $PLR = 1 - \frac{1}{(N'-1)}$  einstellt.

Für  $\alpha_{ret}^{max} = 5$  erreicht die Paketverlustrate gemäß Abbildung 10.7 bei  $PLR \approx 4\%$  ein relatives Minimum. Bei geringer Anzahl von Paketwiederholungen gehen Datenpakete verloren, die seitens des Funksenders herausgefiltert werden, obwohl sie noch nicht übertragen wurden. Bei höherer Anzahl von Paketwiederholungen steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Datenpakete beim Funkempfänger ankommen, die eine harte Echtzeitschranke nicht einhalten können und somit als verlorenes Datenpaket gezählt werden. Mit der Parametrierung  $\alpha_{ret}^{max} = 5$  wird für die Paketverlustrate der beste Kompromiss aus beiden Kriterien erzielt.

Die resultierende Übertragungslatenz für den *OPT*-Batch veranschaulicht Abbildung 10.8. Dargestellt wird die Übertragungslatenz  $D_{a,n}$  über der maximalen Anzahl von Paketwiederholungen  $\alpha_{ret}^{max}$ . In die Ermittlung von  $D_{a,n}$  gehen ausschließlich diejenigen Datenpakete ein, die auf der Empfangsseite registriert werden. Andererseits bleiben in dieser Statistik Datenpakete unberücksichtigt, die bereits sendeseitig herausgefiltert werden. Entsprechend ergibt sich für  $\alpha_{ret}^{max} = 0$  die minimale Übertragungslatenz  $\min(D_{a,n}) = 0.12$  ms; das Datenpaket des Gewinners um den Medienzugriff wird verzögerungsfrei übertragen, während die anderen Funkteilnehmer ihr Datenpaket wiederholen müssten, was aufgrund des Kriteriums  $\alpha_{ret}^{max} = 0$  entfällt. In diesem Fall wird zwar eines der  $N' - 1$  Datenpakete mit minimaler Übertragungslatenz übertragen, die anderen Pakete gehen aber verloren.

Im Arbeitspunkt der minimalen Paketverlustrate –  $PLR \approx 4\%$  für  $\alpha_{ret}^{max} = 5$  – beträgt gemäß Abbildung 10.8 die mittlere Übertragungslatenz eines Datenpakets  $D_{a,n} \approx 0,5$  ms. Bezogen auf die Aktualisierungszeit  $T_{up} = 2$  ms erscheint die Übertragungslatenz damit ausreichend. Eine kompakte Auflistung und Gegenüberstellung von Statistiken über alle Simulationsläufe hinweg erfolgt in Abschnitt 10.2.3.

Im Gegensatz dazu steht die minimale Paketverlustrate von  $PLR \approx 4\%$  einer Verwendung des wettbewerbsorientierten Medienzugriffsverfahrens im dedizierten Anwendungsfall im Wege. Im folgenden Abschnitt 10.2.2.3 wird daher eine Modifizierung des Medienzugriffsverfahrens untersucht.

### 10.2.2.3. MAC-Batch

Im Simulationslauf *MAC-Batch* wird das Medienzugriffsschema von einem wettbewerbsorientierten in ein deterministisches Verfahren überführt. Konkret wird das Simulationsmodell um eine Access-Control-Methode erweitert, die zwischen der Anwendungs- und der Kommunikationsschicht wirksam ist. In der Kommunikationsschicht arbeitet weiterhin ein CSMA/CA-basiertes Medienzugriffsschema. Darüber hinaus werden die Zeitpunkte, zu denen die Anwendungsschicht Datenpakete an die unterliegende Kommunikationsschicht aussendet, zeitlich synchronisiert und schrittweise in ein Zeitschlitz-basiertes Schema überführt, sodass schließlich jedem Funkteilnehmer das Übertragungsmedium exklusiv zur Verfügung steht. Der Vorteil dieses Access-Control-basierten Ansatzes besteht darin, dass das Funksystem weiterhin mit off-the-shelf Standardkomponenten betrieben werden kann. Andererseits herrschen hohe Anforderungen an die Güte der Synchronisation zwischen den Komponenten, die im Bereich weniger  $\mu$ s liegen, sowie an die Verlässlichkeit von Laufzeiten innerhalb einer Komponente.

Zunächst zeigt Abbildung 10.9 die Paketverlustrate  $PLR$  über der Zeitschlitzdauer  $dT_{slot}$  der übergeordneten Access-Control-Methode. Wie für den Simulationslauf *OPT-Batch* wird eine Anwendung mit  $N' - 1 = 5$  steuerungsfernen Sub-Systemen betrachtet, wobei die Anzahl der Paketwiederholungen  $\alpha_{ret}$  unbegrenzt bleibt. Es zeigt sich, dass die Paketverlustrate  $PLR$  generell sinkt, wenn  $dT_{slot}$  steigt. Allerdings erfolgt dieses Absinken zunächst nur unwesentlich im Rahmen der gleichen Dimension, das heißt von einer  $PLR \approx 8\%$  für  $dT_{slot} = 0,01$  ms auf eine  $PLR \approx 3\%$  für  $dT_{slot} = 0,05$  ms. Der Grund hierfür liegt darin, dass  $dT_{slot}$  immer noch kleiner ist als die Paketdauern oder die CSMA/CA-basierten Wartezeiten. Die Performance wird folglich weiterhin zuvorderst durch CSMA/CA bestimmt. Erst wenn  $dT_{slot}$  weiter ansteigt und die Größenordnung der Latenz einer Paketübertragung erreicht, erfolgt der Medienzugriff exklusiv und wettbewerbslos. Da sonstige Übertragungsfehler gemäß der Randbedingungen für die Simulationsstudie nicht berücksichtigt werden, treten im vorliegenden Modell für  $dT_{slot} \geq 0,1$  ms schlicht keine Paketfehler ( $PLR \rightarrow 0$ ) auf, die in Abbildung 10.9 dargestellt werden könnten.

Den Einfluss der Access-Control-Methode auf die Übertragungslatenz  $D_{a,n}$  der Istwertübertragung veranschaulicht Abbildung 10.10. Auch hier verringert sich  $D_{a,n}$ , wenn die Dauer der Zeitslitze  $dT_{slot}$  erhöht wird. Im Idealfall des wettbewerbslosen Medienzugriffs, der einer Parameterwahl für die Dauer des Zeitschlitzes  $dT_{slot} = 0,1$  ms entspricht, wird die minimale Latenz  $\min(D_{a,N}) = 0,12$  ms für die Übertragung eines Datenpakets erzielt. Diese Größe und ihre Bestandteile wurden im Kontext der Ergebnisse des  $N'$ -Batch bereits analysiert.

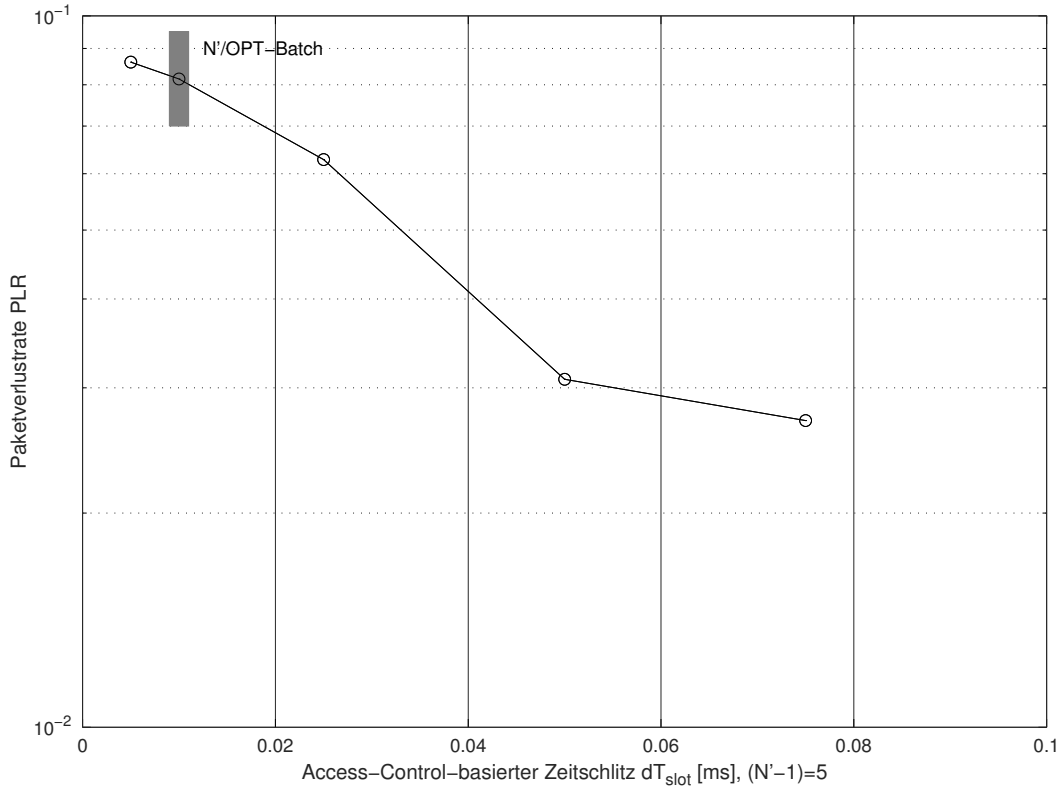


Abbildung 10.9.: Paketverlustrate  $PLR$  über der Dauer  $dT_{slot}$  eines Zeitschlitzes der Access-Control-Methode für  $N' - 1 = 5$ .

In Summe zeigen die Ergebnisse für den  $MAC$ -Batch, dass mit geeigneter Wahl von  $dT_{slot}$  für das gegebene Simulationsmodell – bestehend aus CSMA/CA-basierten Medienzugriff und Zeitschlitz-gesteuerter Access-Control-Methode – ein deterministisches Kommunikationssystem entworfen werden kann. Zunächst wird ein 25%-iger Anteil der Übertragungskapazität für die Sollwertübertragung reserviert – entsprechend verbleiben 75% der Kapazität für die Istwertübertragung. Mit den Parametern seitens der Anwendung – der Aktualisierungszeit  $T_{up}$  und der Anzahl der Sub-Systeme  $N' - 1$  – lässt sich bei gleicher Verteilung auf alle Funkteilnehmer theoretisch auf die maximale Dauer eines Zeitschlitzes  $\tau_{slot}^{max}$  schließen

$$\tau_{slot}^{max} = 0,75 \cdot \frac{T_{up}}{N' - 1} . \quad (10.1)$$

Abbildung 10.11 veranschaulicht den Zusammenhang aus Gleichung (10.1) und stellt  $\tau_{slot}^{max}$  über der Anzahl der Sub-Systeme  $N' - 1$  für verschiedene Aktualisierungszeiten  $T_{up}$  dar. Hervorgehoben sind zum einen die Ergebnisse für  $N' - 1 = 5$ , um den Bezug zum  $OPT$ - und  $MAC$ -Batch herzustellen. Zum anderen hebt Abbildung 10.11 den  $MAC$ -Batch hervor, bei dem ab einer Zeitschlitzdauer  $dT_{slot} = 0,1$  ms eine konfliktfreie Datenübertragung möglich ist. Dies wird im folgenden als die – ausschließlich von den Funktechnologie abhängige – minimale Zeitschlitzdauer  $\tau_{slot}^{min}$  bezeichnet. Schlägt man schließlich die Brücke zu den Anforderungen des konkreten Fallbeispiels der Verpackungsmaschine – mit  $N' - 1 \leq 5$  steuerungsfernen Sub-Systemen und einer Aktualisierungszeit von  $T_{up} = 5$  ms –, so bietet der dargestellte Lösungsansatz

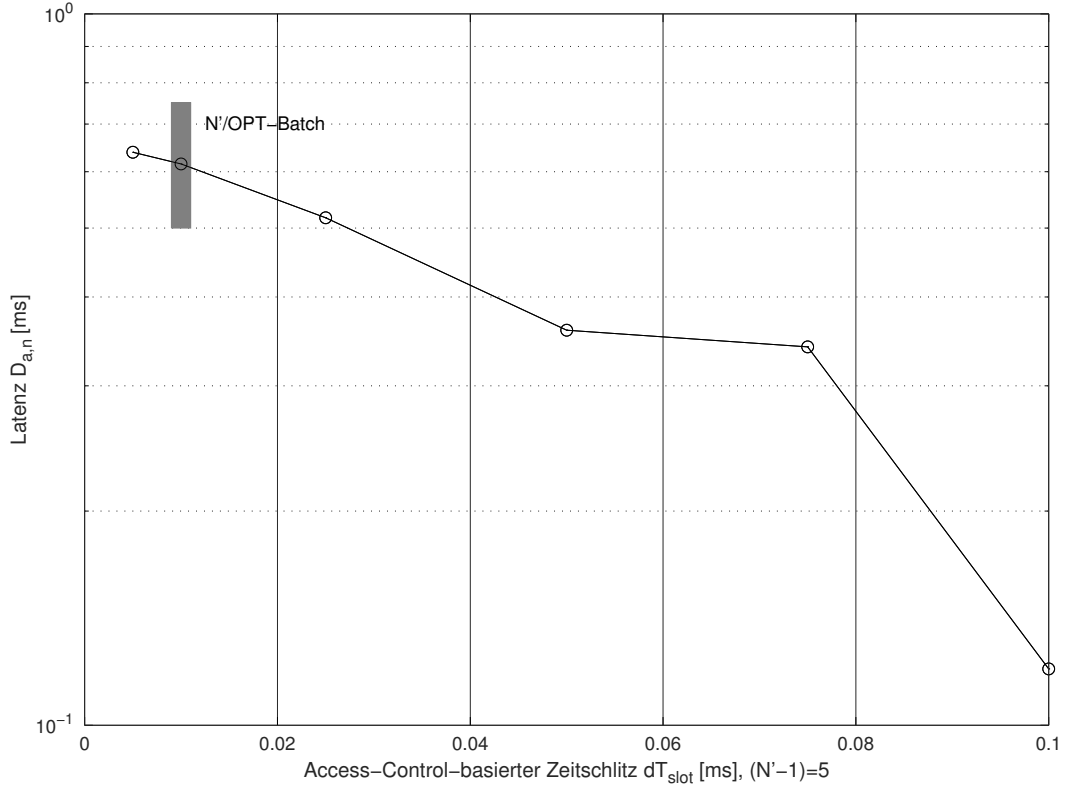


Abbildung 10.10.: Übertragungslatenz  $D_{a,n}$  über der Dauer  $dT_{slot}$  eines Zeitschlitzes der Access-Control-Methode für  $N' - 1 = 5$ .

genügend Marge hinsichtlich der Auslegung von Zeitschlitz. Für das konkrete Modell kann  $dT_{slot}$  demnach in folgendem Wertebereich gewählt werden

$$\tau_{slot}^{min} \leq dT_{slot} < \tau_{slot}^{max}(T_{up}, N'). \quad (10.2)$$

Dabei ist  $\tau_{slot}^{min}$  durch die Übertragungsverzögerung der Funkstrecke bestimmt – in der Simulationsstudie gilt  $\tau_{slot}^{min} = 0,1$  ms. Die obere Schranke  $\tau_{slot}^{max}$  ist durch Gleichung (10.1) festgelegt – für die konkreten Parameter mit  $N' - 1 = 5$  und  $T_{up} = 2$  ms gilt  $\tau_{slot}^{max} = 0,3$  ms. Die Marge zwischen  $\tau_{slot}^{max}$  und  $\tau_{slot}^{min}$  kann wiederum unmittelbar in die Reservierung von Zeitschlitz für Paketwiederholungen einfließen. Für das betrachtete Beispiel stehen demnach jedem Funk-Slave  $\lfloor \tau_{slot}^{max} / \tau_{slot}^{min} \rfloor = 3$  Zeitschlitz pro Datenpaket zur Verfügung.

### 10.2.3. Bewertung

Die Statistiken der Messergebnisse der drei Simulationsläufe fasst Tabelle 10.2 zusammen. Für den  $N'$ -Batch zeigt sich, dass die Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Übertragungslatenz und der Zuverlässigkeit mit dem auf Standardkomponenten beruhendem Funksystem – einschließlich seines wettbewerbsorientierten Medienzugriffs – für  $N' - 1 = 1$  oder 2 Sub-Systeme ausreicht. In diesen Systemkonfigurationen wird eine Paketverlustrate von  $PLR < 10^{-5}$  erreicht. Dazu bleibt die Übertragungslatenz signifikant unterhalb der Echtzeitschranke. Es gilt  $\mu(D_{a,n}) + 7 \cdot \sigma(D_{a,n}) < T_{up}/2$  bei einer Aktualisierungszeit  $T_{up} = 2$  ms über alle Simulationsläufe.

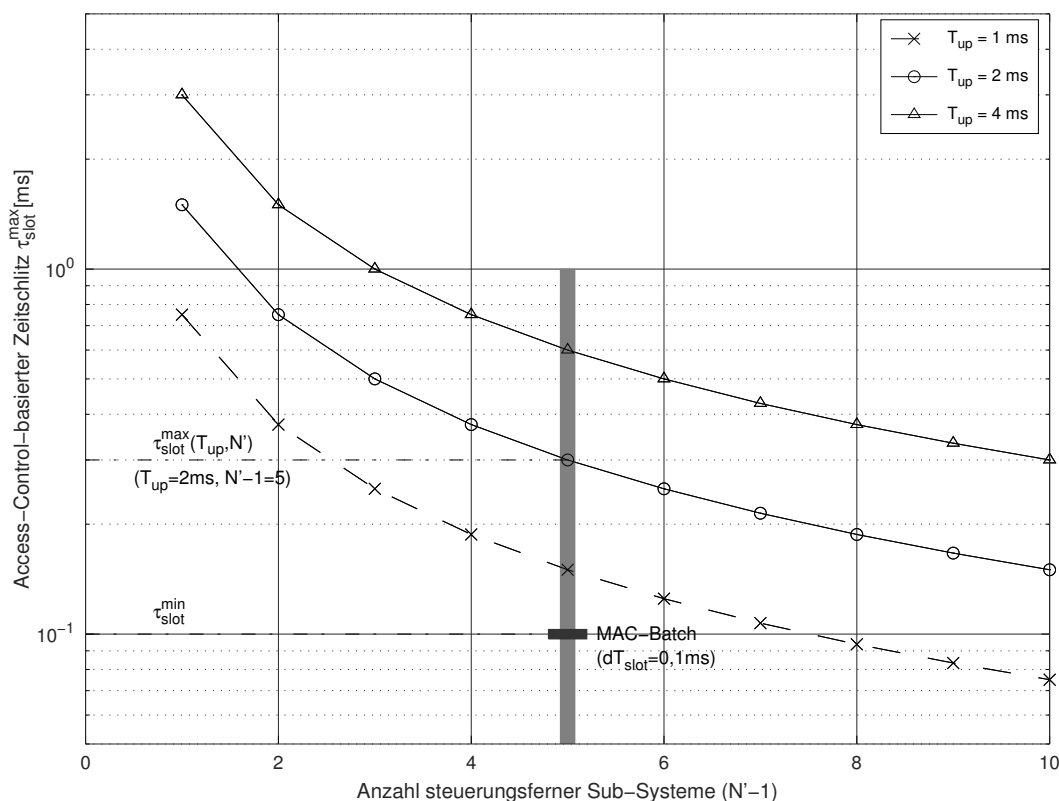


Abbildung 10.11.: Zeitschlitzdauer  $\tau_{slot}^{max}$  der Access-Control-Methode über der Anzahl steuerungsferner Sub-Systeme  $N'-1$ .

Mit steigender Zahl der Sub-Systeme erhöht sich die Zufälligkeit, die durch das Medienzugriffsschema und dessen Wartezeiten injiziert wird. Die Standardabweichungen  $\sigma(D_{a,n})$  für die Latenz als auch für die Anzahl der Paketwiederholungen  $\sigma(\alpha_{ret})$  reflektiert diesen Anstieg. Für das nach den Anforderungen des Anwendungsbeispiels auszulegende System mit  $N' - 1 = 5$  ist damit gemäß  $N'$ -Batch eine ungenügende Leistungsfähigkeit zu diagnostizieren. Bis zur Echtzeitschranke verbleibt lediglich eine Marge von  $\approx 0,25 \cdot \sigma(D_{a,n})$  bei einer Paketverlustrate von  $PLR \approx 8\%$ .

Für den *OPT*-Batch wird die Zahl der Sub-Systeme auf  $N' - 1 = 5$  festgelegt. Wie beim  $N'$ -Batch wird das wettbewerbsorientierte Medienzugriffsschema eingesetzt, wobei die Anzahl von Paketwiederholungen eines Funksenders auf  $\alpha_{ret}^{max}$  begrenzt wird. Für den Bezug zum  $N'$ -Batch ist lediglich die Parametrierung  $\alpha_{ret}^{max} \rightarrow \infty$  zu wählen. Die Maßnahme, Paketwiederholungen zu begrenzen, bringt einen Performancegewinn hinsichtlich der Paketverlustrate als auch der Übertragungslatenz. Dennoch kommt dieser Ansatz im günstigsten Fall für  $\alpha_{ret}^{max} = 5$  nicht über eine Verlustrate von  $PLR \approx 4\%$  hinaus. Die Marge bezüglich der Echtzeitschranke liegt in der Größenordnung von  $1 \cdot \sigma(D_{a,n})$ .

Für den *MAC*-Batch wird das Simulationsmodell um eine Access-Control-Methode erweitert, die dem unterliegenden Medienzugriffsschema Datenpakete der Anwendungsschicht in einem Zeitschlitz-basierten Verfahren zuführt. Das Variieren dieser Zeitschlitzze  $dT_{slot}$  ist Gegenstand



Tabelle 10.2.: Statistiken der Simulationsstudie für Übertragungslatenz  $D_{a,n}$ , Paketwiederholungen  $\alpha_{ret}$  und Paketverlustrate  $PLR$ .

Batch	Parameter	Latenz $D_{a,n}$ [ms]		Paketwiederholungen $\alpha_{ret}$		$PLR$ [%]
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	
$N'$ -Batch	$(N' - 1) = 1$	0,12	0,0	0,0	0,0	0,0
	$(N' - 1) = 2$	0,21	0,11	0,79	0,89	0,0
	$(N' - 1) = 3$	0,30	0,29	1,26	1,11	0,21
	$(N' - 1) = 5$	<b>0,62</b>	<b>1,52</b>	<b>1,90</b>	<b>1,45</b>	<b>8,15</b>
	$(N' - 1) = 7$	1,04	2,83	2,24	1,75	21,72
	$(N' - 1) = 10$	1,67	4,49	2,54	2,13	38,52
$OPT$ -Batch	$\alpha_{ret}^{max} = 0$	0,12	0,00	0,0	0,0	80,00
	$\alpha_{ret}^{max} = 1$	0,17	0,05	0,49	0,50	60,67
	$\alpha_{ret}^{max} = 2$	0,25	0,13	1,12	0,85	35,37
	$\alpha_{ret}^{max} = 3$	0,38	0,24	1,67	1,13	10,51
	$\alpha_{ret}^{max} = 5$	<b>0,48</b>	<b>0,45</b>	<b>1,88</b>	<b>1,30</b>	<b>4,05</b>
	$\alpha_{ret}^{max} = 7$	0,55	0,90	1,89	1,39	7,02
	$\alpha_{ret}^{max} = 10$	0,60	1,34	1,89	1,43	8,04
	$\alpha_{ret}^{max} \rightarrow \infty$	0,62	1,52	1,90	1,45	8,15
$MAC$ -Batch	$dT_{slot} = 0,01$ ms	0,62	1,52	1,90	1,45	8,15
	$dT_{slot} = 0,025$ ms	0,52	1,34	1,54	1,52	6,28
	$dT_{slot} = 0,05$ ms	0,36	0,95	1,04	1,41	3,09
	$dT_{slot} = 0,075$ ms	0,34	0,88	1,12	1,24	2,70
	$dT_{slot} = 0,10$ ms	<b>0,12</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>

des  $MAC$ -Batch. Als Referenz zu  $N'$ -Batch und  $OPT$ -Batch dient die Parametrierung  $dT_{slot} = 0,01$  ms. Damit gilt  $dT_{slot} \ll \min(D_{a,n})$  und das Medienzugriffsverfahren muss den Konflikt konkurrierender Funksender auflösen. Im Gegensatz dazu wird mit  $dT_{slot} = 0,1$  ms – respektive mit  $\tau_{slot}^{min}$  – die minimale Zeitschlitzdauer identifiziert, bei der jeder Funksender exklusiv sein Datenpaket übertragen kann. Vom Medienzugriffsschema selbst resultiert kein Konflikt mehr und alle Datenpakete können ohne Verzögerung mit minimaler Übertragungslatenz  $\min(D_{a,n}) = 0,12$  ms, ohne neuerliche Sendeversuche und ohne Paketverluste übertragen werden.

Im Hinblick auf die Umsetzung des im  $MAC$ -Batch aufgezeigten Ansatzes ist von zentraler Bedeutung, dass Funkteilnehmer synchron zueinander arbeiten. Wie in der Anforderungsanalyse gezeigt, ist die Synchronität von Feldgeräten in hoher Güte auch für industrielle Anwendungen der Feldebene von zentraler Bedeutung. Im Systementwurf wird dieser Anforderung speziell Rechnung getragen und Verfahren zur Synchronisation erarbeitet, deren Ergebnisse auch im Kontext der Access-Control-Methode eingesetzt werden können.

Betrachtet man die Simulationsstudie in Summe, so ist festzustellen, dass hybride industrielle Kommunikationssysteme für eine geringe Anzahl bis zu  $N' - 1 = 2$  von der zentralen Steue-

rung abgesetzten Sub-Systemen mit funkbasierten Standardkomponenten ausgerüstet werden können. Das dort eingesetzte Medienzugriffsverfahren CSMA/CA reicht aus, sofern eine robuste und störungsfreie Funkkommunikation gewährleistet ist. Wächst hingegen eine industrielle Anwendungen – beziehungsweise werden ihr neue Sub-Systeme hinzugefügt –, so ist eine Anpassung des Medienzugriffsverfahrens hin zu einem deterministischen Schema unausweichlich. Wie in den Untersuchungen zum *MAC*-Batch gezeigt, kann dies mittels eines Access-Control-basierten Zeitschlitzverfahrens geschehen, das zwischen Anwendungs- und Kommunikationsschicht platziert wird und in Kombination mit dem herkömmlichen, wettbewerbsorientierten Medienzugriffsverfahren der Funktechnologie operiert.

# 11. Schlussfazit

Im Schlussfazit wird zunächst im Rahmen einer Retrospektive in Abschnitt 11.1 auf die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit zurückgeblickt und der in diesem Kontext erarbeitete wissenschaftliche Beitrag hervorgehoben. Im darauffolgenden Ausblick in Abschnitt 11.2 richtet sich der Blick in die Zukunft – Wo liegen potentielle Forschungsfelder, welche Weiterentwicklungen sind zu erwarten?

## 11.1. Retrospektive – Beitrag

Als Ausgangspunkt findet diese Arbeit die Automatisierungstechnik in einer Zeit vor, die auf der einen Seite durch den klassischen Maschinenbau eher konservativ geprägt ist, auf der anderen Seite durch die zunehmende Bedeutung der Informationstechnik eine zunehmende Dynamik spürbar werden lässt, insbesondere ausgelöst durch den Hype um Industrie 4.0. Hinsichtlich industrieller Kommunikationssysteme in der Automatisierung fungiert der Mobilfunkstandard 5G als wesentlicher Treiber, der zwar das Potenzial besitzt, die Automatisierungstechnik künftig zu beeinflussen, bislang allerdings noch in den Startblöcken verharrt – weniger aus technischer als aus organisatorischer Sicht.

In eben diesem Umfeld setzt die vorliegende Arbeit auf. Funktechnologien haben sich in einigen Branchen der Automatisierungstechnik bereits etabliert, eigene industrielle Funkstandards haben sich entwickelt. Auch sehen die Kunden die unabdingbaren Vorteile, die mit dem Einsatz von Funktechnik einhergehen. Allerdings genügen existierende Funktechnologien nicht den Anforderungen aller industrieller Anwendungen, insbesondere den Anwendungen mit Echtzeitanforderungen auf der Feldebene der Fertigungsautomatisierung. Darüber hinaus sieht sich die Automatisierungsbranche dem Konflikt ausgesetzt, dass die Eigenentwicklung von Funktechnologien ein kostenintensives Investment – in Anbetracht der unterschiedlichen Anforderungen industrieller Anwendungen diverser Branchen wahrscheinlich ein zu hohes Investment – darstellt. Zudem gestaltet sich die Partizipation in Gremien zur Funkstandardisierung und -regulierung als steiniger und zeitintensiver Weg, der einen Interessenausgleich mit allen Beteiligten – zuvorderst genannt seien die einflussreichen Halbleiterhersteller sowie die Vertreter der Mobilfunk- und Consumer-Branchen – bedingt.

Infolgedessen verfolgt diese Arbeit den Ansatz, auf existierende Funktechnologien – namentlich die Technologien der IEEE-802.xx-Familie – zu fokussieren, die in den frei verfügbaren ISM-Bändern operieren. Damit umgeht man zum einen das Problem der Funkregulierung, wenn auch zum Preis der Koexistenz von Funktechnologien und -systemen in den frei verfügbaren Bändern. Zum anderen profitiert man von einer großen Fülle funkbasierter Bausteine, die dank der hohen Stückzahlen im Consumer-Markt off-the-shelf verfügbar und daher kostengünstig zu erwerben sind. Unter all diesen Rahmenbedingungen erbringt die vorliegende Arbeit schließlich die folgenden konkreten Beiträge:

### Strukturierung des Problemraums

Bevor eine technische Lösung entwickelt werden kann, muss eine klar definierte Umschreibung des Problemraums vorliegen. In dieser Arbeit wird dazu eine systematische Kategorisierung von Branchen und Aufgabenfeldern der Automatisierungstechnik aufgezeigt, in deren Schema die *Feldebene der Fertigungsautomatisierung* verortet wird. Dieser Sektor – samt seiner Fülle von Anwendungsfällen – wird einer tiefgreifenden Analyse unterzogen, die auf Datensammlungen, direkten Kundenanfragen und dedizierten Umfragen von *Bosch Rexroth*-internen Branchenvertretern und Produktmanagern beruhen. Diese mitunter sensiblen Daten sind exemplarisch in Form einer Untermenge der existierenden Datensätze veröffentlicht [45].

Die Ergebnisse der Anforderungsanalyse werden in charakteristischen *Anforderungsprofilen* zusammengetragen, die eine systematische Klassifizierung von Anwendungen und deren Anforderungen auf Feldebene der Fertigungsautomatisierung repräsentieren. Die Anforderungsprofile umfassen die Parameter Datenratenbedarf, Übertragungslatenz, Jitter, Paketverlustrate, Knotenzahl und die Anzahl beweglicher Maschinenteile einer Anwendung. In Summe erweisen sich *Motion-Control-basierte Anwendungen* als das Anforderungsprofil mit den höchsten Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit, die im Wesentlichen durch die Übertragungslatenz sowie den Jitter im Bezug auf die Aktualisierungszeit einer Anwendung gekennzeichnet ist.

### Modellbildung für industrielle Kommunikationssysteme

Bei vielen legacy Systemen der Automatisierungstechnik kann man eine Durchmischung von anwendungs- und kommunikationsspezifischen Funktionalitäten – sei es aus Gründen der Optimierung, fehlender Architekturfestlegungen, oder anderen – feststellen. In dieser Arbeit wird daher ein generisches *Schichtenmodell der industriellen Kommunikation* eingeführt, das eine strikte Trennung zwischen Anwendungs- und Kommunikationsschicht vorsieht und beide Schichten über eine klare Schnittstelle spezifiziert. Aus Sicht einer Anwendung werden *logische Geräteverbindungen* zwischen Feldgeräten aufgespannt, die mit einem anwendungsspezifischen Anforderungsprofil verknüpft sind. Die unterliegende Kommunikationsschicht erfüllt ein Anforderungsprofil gegen die Schnittstelle, operiert gegenüber der eigentlichen Anwendung aber als Black-Box.

Was das Schichtenmodell für die Systemarchitektur, sind die *Parametermodelle* für die Bewertung der Leistungsfähigkeit einer Lösung und ihrer Kenngrößen. In dieser Arbeit werden daher für alle relevanten Parameter – für Übertragungslatenz, Reaktionszeit, Jitter und Paketverlustrate – Modelle entwickelt, die zur analytischen Evaluierung der Lösungsansätze einerseits, und zum Vergleich mit Messgrößen aus der Simulationsstudie und dem Demonstratorsystem andererseits herangezogen werden.

### Konzept eines hybriden industriellen Kommunikationssystems

Eine wichtige – nicht explizit genannte, aber implizit ermittelte – Kundenanforderung lautet, man wolle kein *entweder/oder* von drahtgebundener oder funkbasierter Technologie, als vielmehr ein *sowohl/als auch*. Dem entgegenet diese Arbeit mit der *Systemarchitektur eines hybriden industriellen Kommunikationssystems*, die von Grund auf für eine Kopplung unterschiedlicher Kommunikationstechnologien ausgelegt ist und damit inhärent beide Kommunikationsformen berücksichtigt. Mit dem modellbasierten Baukastensystem aus Schichtenmodell, logischen

Geräteverbindungen und Anforderungsprofilen steht bereits ein theoretischer Rahmen zur Verfügung, aus dem die Systemarchitektur des hybriden industriellen Kommunikationssystems aufgebaut wird.

Als praxisrelevante Ausführungsform des hybriden industriellen Kommunikationssystems wird in dieser Arbeit eine *Industrial-Ethernet-Brücke* entworfen. Sie verbindet Industrial-Ethernet-basierte *Sub-Systeme*, die bewegliche Maschinenteile einer Anwendung modellieren, über ein zwischengeschaltetes Funksystem mit einer Steuerung. Zentrale Elemente der Industrial-Ethernet-Brücke sind die *Koppelkomponenten*, die die Kommunikation von drahtgebundener und funkbasierter Technologie über ihre *Konvergenzschicht* ineinander überführen. Mit diesem modularen, Schichten-basierten Ansatz können durch einfache Anpassung der Konvergenzschicht verschiedenartige Funk- und Industrial-Ethernet-Systeme in die Koppelkomponente integriert werden.

Die Machbarkeit und die Leistungsfähigkeit der Industrial-Ethernet-Brücke werden mittels Fallstudien im Kontext konkreter Anwendungsbeispiele evaluiert. Gemäß des Fallbeispiels einer Rundtaktmaschine validiert ein *Demonstratorsystem* die Industrial-Ethernet-Brücke zu einem steuerungsfernen Sub-System. Dieses modelliert die Feldgerätegruppe auf dem beweglichen Drehtisch der Rundtaktmaschine. Als Kommunikationstechnologien setzt das Demonstratorsystem das Industrial-Ethernet-System sercos III und IEEE-802.11n-basierte Funkkomponenten ein. Hinsichtlich der Leistungsfähigkeit ergibt sich eine Übertragungslatenz  $\approx 3,5$  ms über die Funkstrecke des Demonstrators, womit Anwendungen mit harten Echtzeitanforderungen bis zu einer Aktualisierungszeit von 8 ms realisierbar sind [144].

Während das Demonstratorsystem den Fokus auf die prinzipielle Machbarkeit des hybriden industriellen Kommunikationssystems und dessen Umsetzung im Realbetrieb legt, richtet eine *Simulationsstudie* ihren Schwerpunkt auf die Leistungsfähigkeit des Funksystems – insbesondere dessen Medienzugriffsschema. Gemäß des Fallbeispiels einer Verpackungsmaschine werden Industrial-Ethernet-Brücken von einer zentralen Steuerung zu bis zu 5 steuerungsfernen Sub-Systemen – respektive beweglichen Maschinenteilen – aufgespannt. Die Studie zeigt, dass mit einem wettbewerbsorientierten Medienzugriff – eben diesen nutzt das im Demonstratorsystem eingesetzte IEEE 802.11n – bis zu 2 steuerungsferne Sub-Systeme angebunden werden können. Mit deterministischem Medienzugriff hingegen, der in der Studie als Zeitschlitzverfahren in Form einer proprietären Access-Control-Methode für IEEE 802.11n realisiert wird, können gemäß des Anwendungsbeispiels alle 5 Sub-Systeme unter Wahrung der Echtzeitfähigkeit angebunden werden.

## Verfahren zur Synchronisation

Das für die analytischen Betrachtungen und die Umsetzung im Demonstratorsystem eingesetzte sercos III stellt ein Industrial-Ethernet-System vom Typ 3 dar, dessen Synchronisationsverfahren eng mit den Eigenschaften der physikalischen Schicht, speziell mit der Laufzeit auf dem Übertragungsmedium, verzahnt ist. In dieser Arbeit werden daher zwei Synchronisationsverfahren entworfen, um die Anforderungen der Synchronität der Feldgeräte über eine Industrial-Ethernet-Brücke hinweg zu gewährleisten.

Beim ersten Verfahren zur *grobkörnigen Synchronisation* werden die Feldgeräte der steuerungsfernen Sub-Systeme zur zentralen Steuerung mit einem maximalen Versatz in der Grö-

Benennung der Zykluszeit – also weniger Millisekunden – der Sub-Systeme synchronisiert. Diese Genauigkeit ist ausreichend für manche Anwendungen, beispielsweise für Positionierungsaufgaben, die mit einer offenen Regelschleife – einer automatisierungstechnischen Steuerung – auskommen. Eine höhere Genauigkeit im Bereich weniger Mikrosekunden ermöglicht das zweite Verfahren zur *feinkörnigen Synchronisation* der Sub-Systeme. Mit dieser Genauigkeit können Closed-Loop-Anwendungen über eine Industrial-Ethernet-Brücke realisiert werden. Beide Verfahren werden anhand der praktischen Umsetzung mittels des Demonstratorsystems evaluiert.

### 11.2. Zukunftsperspektive – Ausblick

Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept des hybriden industriellen Kommunikationssystems eignet sich prinzipiell für ein breites Anwendungsfeld – auch über industrielle Anwendungen der Feldebene hinaus. Die zugrunde liegende Systemarchitektur ist zum einen nicht auf konkrete Kommunikationstechnologien beschränkt, zum anderen kann die zugehörige theoretische Basis des Systemmodells einfach erweitert werden.

Die Industrial-Ethernet-Brücke stellt demnach nur eine Realisierungsform des hybriden Kommunikationssystems dar, die für industrielle Anwendungen auf Feldebene der Fertigungsautomatisierung eine optimale Lösung im Sinne der analysierten Anwendungsfälle darstellt. Mit dem vorliegenden Modell kann hingegen jede Form der Kaskadierung von Kommunikationssystemen und -technologien abgebildet werden, angefangen von einem einfachen, durch eine Steuerung direkt aufgebauten, Funksystem für reine Sensor-Netzwerke bis hin zu sequentiell verknüpften Sub-Systemen, bei denen beispielsweise ein beweglicher Maschinenteil selbst wieder einen beweglichen Maschinenteil beinhaltet.

Im Hinblick auf die Umsetzung der Industrial-Ethernet-Brücke mit dem Demonstratorsystem weisen Wege zur Überführung in konkrete Produkte. Dazu reicht es aus, existierende Antriebskomponenten um eine off-the-shelf Funkkomponente zu erweitern und diese effizient, insbesondere latenzarm, an die internen Rechnerkapazitäten anzubinden. Damit kann die im Demonstrator ermittelte Übertragungslatenz signifikant reduziert werden, da zusätzliche Signalwandlungen und Schnittstellen, wie sie im Demonstratorsystem nötig waren, hinfällig werden.

Ein weiteres großes Forschungsfeld knüpft an die analytischen Betrachtungen zu einem idealtypischen Funksystem an. Im Hinblick auf die dargestellten Anforderungen der Feldebene kann zwar ein theoretisch optimales, idealtypisches Modell eines Funksystems aufgezeigt werden. Der Aufwand und die Schlagkraft, die zur Umsetzung eines solchen Modells – insbesondere für das Radiomodul, dessen Bitübertragungsschicht und Luftschnittstelle – nötig sind, erweisen sich als enorm. Hier weisen zwei mögliche Pfade in die Zukunft:

- Zum einen kann sich eine Interessengemeinschaft innerhalb der Automatisierung bilden, die gemeinschaftlich den Aufwand einer Neuentwicklung stemmt. Erforderlich ist hierzu die Unterstützung von Spezialisten für Funktechnologien, beispielsweise seitens der Halbleiterindustrie, sowie die enge und kooperative Zusammenarbeit innerhalb der Automatisierungsbranche. – Der Blick in die Vergangenheit sowie die zerklüftete Situation für Standards bei Feldbussen und Industrial-Ethernet-Systemen mit teils rudimentärer Interoperabilität lassen für diesen Ansatz aus heutiger Sicht wenig Hoffnung.

- Der andere Weg heißt schlicht *5G*: Zum einen bietet der neue Mobilfunkstandard 5G – im Kern bereits dessen Vorgänger LTE – technologisch gesehen die richtigen Zutaten für ein idealtypisches Funksystem für die industrielle Kommunikation. Zudem wirken starke, nicht-technische Interessen an einer weitläufigen Durchdringung verschiedenster Marktsegmente mit 5G, so auch für Machine-to-Machine (M2M) im Kontext von Anwendungen für Industrie 4.0 oder Industrial IoT. Auch seitens der Regulierungsbehörden ist mit der expliziten Frequenzzuweisung zur privaten Nutzung für industrielle Produktionsanlagen der Weg bereitet.

So mächtig die Bemühungen für eine Penetration von 5G im industriellen Bereich auch sind, so unklar ist bislang dennoch – zum Herbst 2020 –, wie weit 5G in der Automatisierungstechnik wirksam werden kann. Insbesondere die Frage des Geschäftsmodells für den mittelständischen Maschinenbauer scheint weiterhin unbeantwortet. Für ihn bleiben bis auf weiteres Abhängigkeiten von zumeist externen Betreibern und den daraus resultierenden Kosten, während man nach den ursprünglichen Erwartungen von einer wirklich privaten Nutzung von Frequenzbändern mit 5G-Campusnetzen ausging. Solange diese organisatorischen Fragestellungen samt unterschiedlicher Interessenlagen zwischen Mobilfunkprovidern, Netzwerkausrüstern, Regulierungsbehörden und den eigentlichen Kunden privater 5G-Campusnetze weiterhin unbefriedigend beantwortet bleiben, stellen funkbasierte Ansätze mit off-the-shelf Komponenten in den lizenzfreien ISM-Bändern eine bevorzugte und vor allem kalkulierbare Lösung dar – sofern die Echtzeitanforderungen industrieller Anwendungen erfüllt werden. Damit ist die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Industrial-Ethernet-Brücke gepaart mit den Funktechnologien der IEEE-802.xx-Familie insbesondere für den mittelständischen Maschinenbau ein attraktives und nachhaltiges Angebot.





**Teil IV.**

**Anhang**

## A. Serviceorientiertes Schichtenmodell

In der Computertechnik – wie in der Telekommunikation – ist der Einsatz eines Schichtenmodells (Layered Architecture) gängige Praxis. Dabei stellt eine Schicht  $N$  einer überliegenden Schicht  $N + 1$  einen bestimmten Dienst (Service) zur Verfügung. Ist Schicht  $N$  der Dienstanbieter (Service Provider), so greift Schicht  $N + 1$  als Dienstanwender (Service User) auf den Service von Schicht  $N$  zu. Dieser Zugriff erfolgt über eine definierte Schnittstelle (Service Access Point, SAP) mittels sogenannter Dienstelemente (Service Primitives).

### Nachrichtenfluss – Service Primitives

Abbildung A.1 zeigt schematisch den Nachrichtenablauf zwischen zwei Kommunikationspartnern unter Verwendung der Service Primitives. Dabei nimmt ein Kommunikationspartner die Rolle des Anforderers (Requester), einer die Rolle des Empfängers (Acceptor) eines Services ein. Folglich fordert der Service User (des Requesters) einen Dienst des Service Providers an, wofür er das Primitive *Request* verwendet. Schicht  $N$  führt ihren Service, verteilt über das Gesamtsystem bestehend aus Requester und Acceptor, aus und notifiziert den Service User (des Accepters) über das Primitive *Indication*. Der Service User (des Accepters) bestätigt den Empfang der Service-Notifizierung über das Primitive *Response*, was wiederum den Service User (des Requesters) durch das Primitive *Confirmation* notifiziert.

### Confirmed und Unconfirmed Services

Liegt diese vollständige Kette von Service Primitives aus *Request*, *Indication*, *Response* und *Confirmation* vor, spricht man von einem *Confirmed Service*. Entfällt der Rückkanal von Service Acceptor zu Requester – bestehend aus Primitive *Response* und *Confirmation* –, so spricht man von einem *Unconfirmed Service* [125].

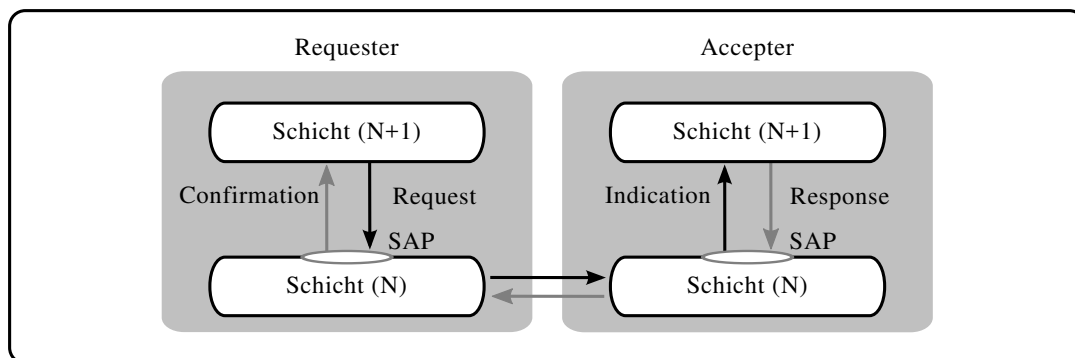


Abbildung A.1.: Serviceorientiertes Schichtenmodell (in Anlehnung an [125]).

## B. Grundlegende Betriebsarten

Als grundlegende Betriebsarten eines Kommunikationssystems werden im Kontext dieser Arbeit die Multiplex-Eigenschaften, die Duplex-Fähigkeit und die Synchronität betrachtet.

### Multiplex zur Nutzertrennung

Allgemein bieten sich eine Reihe von Freiheitsgraden, wie ein funkbasiertes Kommunikationssystem die Datenübertragung von Funkteilnehmern in einem Mehrnutzersystem – einem Funksystem mit mehreren Funkteilnehmern – organisieren kann. Vorrangig werden zur Nutzertrennung Multiplexverfahren eingesetzt, die auf physikalischen Grundgrößen beruhen. Abbildung B.1 veranschaulicht die relevanten Freiheitsgrade zur Nutzertrennung und zeigt für eine Sterntopologie aus einem Funk-Master (FM) und seinen  $N$  Funk-Slaves, wie der Medienzugriff der Funk-Slaves in Form von Zeitschlitzten  $t_i$  (Abbildung B.1a), Frequenzbändern  $f_i$  (Abbildung B.1b), Codewörtern  $c_i$  (Abbildung B.1c) oder Antennenkonfigurationen und räumlichen Strömen  $s_i$  (Abbildung B.1d) realisiert werden kann.

In der Praxis finden sich Überlagerungen dieser Grundschemata, die mitunter mit überliegenden Protokollen gepaart werden. Beispielweise kombiniert der Mobilfunkstandard LTE Zeit- und Frequenzmultiplex, womit er seine Funkteilnehmer durch die exklusive Zuweisung von Zeit-Frequenz-Ressourcen trennen kann. LTE und WLAN setzen beispielsweise Raummultiplex ein, während UMTS den klassischen Vertreter für Codemultiplex repräsentiert.

### Halbduplex und Vollduplex

Neben dem Multiplex veranschaulicht Abbildung B.2 mit der Duplex-Fähigkeit und der Synchronität die weiteren grundlegenden Betriebsarten eines Kommunikationssystems.

Um bi-direktionalen Datenverkehr, also das Senden und Empfangen von Datenpaketen, zu ermöglichen, beinhaltet eine funkbasierte Kommunikationskomponente sowohl eine Empfangs- (Receiver) als auch eine Sendeeinheit (Transmitter), die typischerweise als eine Halbleiterkomponente (Transceiver) ausgeführt ist. Kann eine Funkkomponente zugleich Datenpakete sowohl senden als auch empfangen, so spricht man von Vollduplex-Modus. Kann eine Funkkomponente Datenpakete senden und empfangen, dies aber ausschließlich zeitlich getrennt, so spricht man von Halbduplex-Modus. Kann eine Funkkomponente nur Senden oder Empfangen spricht man von Simplex-Modus [145], der allerdings für die hier betrachteten Kommunikationssysteme ohne Bedeutung ist. Abbildung B.2a und Abbildung B.2b veranschaulichen Kommunikationssysteme im Halbduplex, während Abbildung B.2c und Abbildung B.2d Systeme im Vollduplex-Modus darstellen.

Klassischer Vertreter eines Kommunikationssystems im Halbduplex-Modus ist WLAN nach IEEE 802.11. Zwei Funkteilnehmer einigen sich auf einen Funkkanal, über den beide Funkteilnehmer Datenpakete austauschen, wobei stets ein Teilnehmer sendet und der andere Teilnehmer empfängt. Der Vorteil des Halbduplex-Modus besteht darin, dass Transceiver

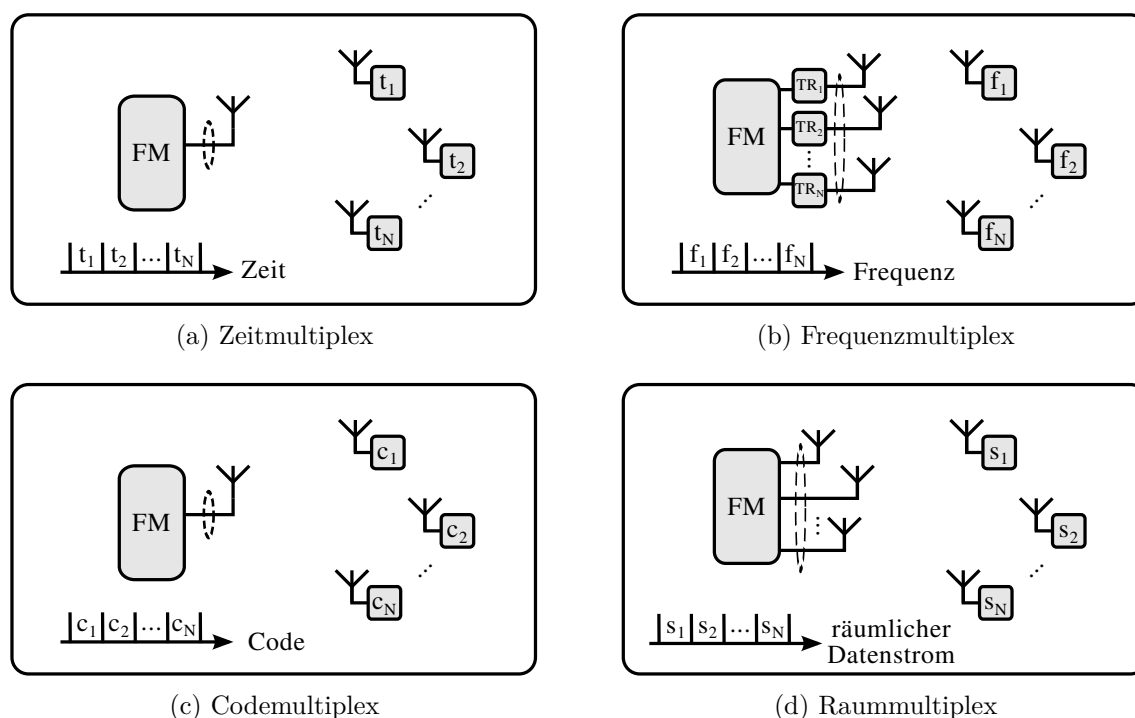


Abbildung B.1.: Grundlegende Multiplexverfahren zur Nutzertrennung.

einfacher und damit kostengünstiger ausgelegt werden können. Würde man WLAN-Transceiver im Vollduplex-Modus betreiben, wären die Selbstinterferenzen das Kernproblem, die die Sendeeinheit der Empfangsstufe zuführt. Jüngste Forschungsergebnisse adressieren genau dieses Thema mittels digitaler Signalverarbeitung, womit kostspielige Akustische Oberflächenwellen (SAW)-Filter vermieden werden könnten [146]. Der Nachteil des Halbduplex-Modus besteht darin, dass die uni-direktional ausgelegte Übertragungsstrecke in Latenzen für bi-direktionalen Datenaustausch resultiert.

Klassische Vertreter des Vollduplex-Modus sind Mobilfunksysteme. Dort wird bei Standards wie GSM, UMTS oder LTE – zumindest mittels FDD – eine exklusive Zuordnung eines Frequenzspektrums für beide Übertragungsstrecken zwischen mobilem Endgerät und Basisstation festgelegt. Vollduplex wirkt sich vorteilhaft auf das Medienzugriffsverfahren aus, da der Wettbewerb um das Medium nur noch für eine Übertragungsrichtung ausgetragen wird. Als Nachteil des Vollduplex-Modus ergibt sich zum einen, dass komplexere Transceiver vonnöten sind. Zum anderen muss mehr Aufwand in die Planung eines Funknetzes und die Nutzung der zugehörigen Frequenzressourcen gesteckt werden, was typischerweise mehr auf verwaltete Funknetze mit einer koordinierenden Instanz zutrifft. In der Praxis sieht man diese Netze damit bei Mobilfunknetzen, weniger bei Ad-hoc-Funkverbindungen.

### Synchrone und Asynchrone Netze

Neben der Duplex-Eigenschaft stellt die Synchronität eines Netzes einen weiteren grundlegenden Betriebsmodus eines Kommunikationssystems dar. Im Gegensatz zu der in Abschnitt 5.4.2 diskutierten Synchronität von Systemkomponenten auf Anwendungsebene wird an dieser Stelle die Synchronität eines Kommunikationssystem selbst, insbesondere seine Synchronität bezüg-

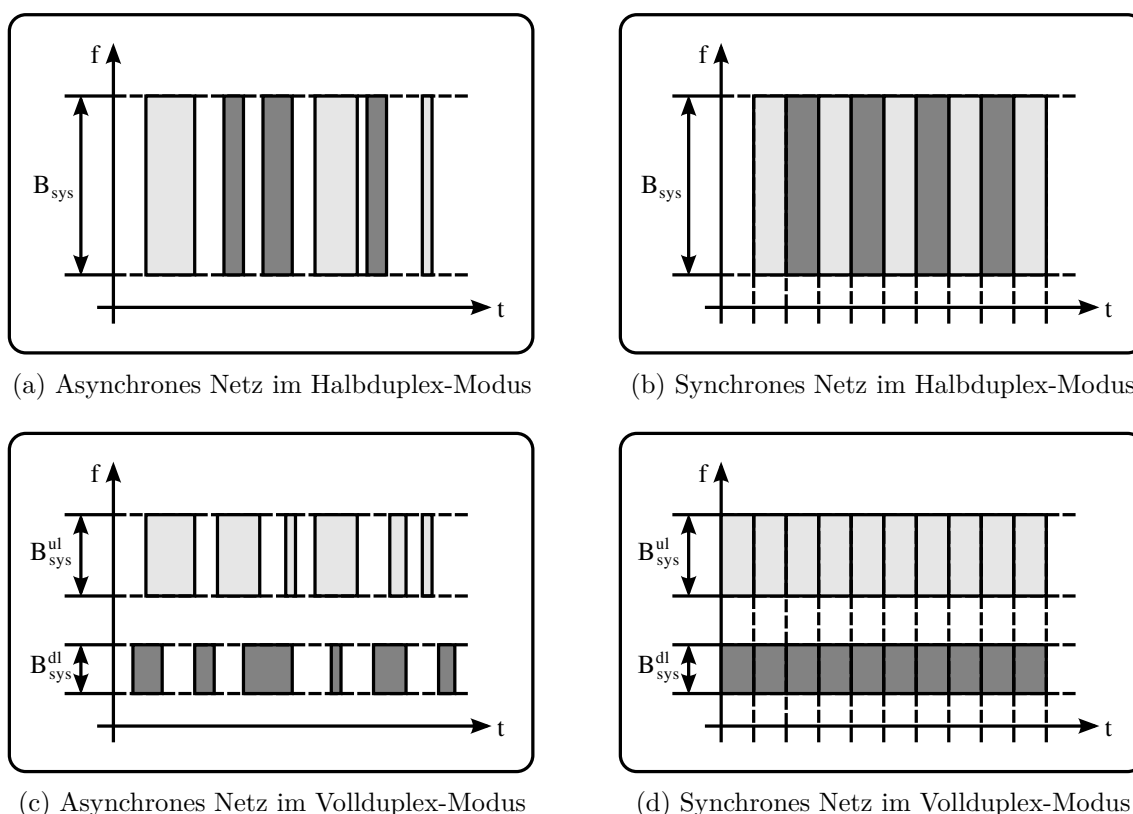


Abbildung B.2.: Grundlegende Betriebsarten von funkbasierten Kommunikationsnetzen.

lich des Medienzugriffs, betrachtet. Im wesentlichen werden zwei Betriebsarten unterschieden, asynchrone und synchrone Netze.

Bei asynchronen Netzen laufen die Zeitbasen aller Funkteilnehmer unabhängig voneinander. Wollen zwei Funkteilnehmer Datenpakete austauschen, so muss dies über das Medienzugriffsverfahren und zugehörige Protokolle geregelt werden. Abbildung B.2a und Abbildung B.2c veranschaulichen Kommunikationssysteme im asynchronen Betriebsmodus für den Halbduplex- und Vollduplex-Modus. Der Vorteil mit asynchronen Netzen besteht darin, dass ein Datenaustausch ohne den Aufbau einer Infrastruktur und das Ausrollen einer einheitlichen Zeitbasis erfolgen kann. Nachteilig wirkt sich die Asynchronität eines Kommunikationssystems hingegen auf Übertragungslatenzen aus, da die Protokolle samt dem Medienzugriff Overhead erzeugen.

Abbildung B.2b und Abbildung B.2d veranschaulichen schließlich Kommunikationsnetze im synchronen Betriebsmodus. Der Vorteil dieses Betriebsmodus besteht darin, dass Medienzugriffsverfahren aufgrund des Vorwissens einer einheitlichen Zeitbasis einfacher und effizienter gestaltet werden können wie beispielsweise mit TDMA. Durch Zuweisen eines festen Zeitschlitzes pro Teilnehmer können Datenpakete innerhalb einer definierten Zeitspanne übertragen werden. Der Nachteil synchroner Netze besteht darin, initialen Aufwand für Verfahren spendieren zu müssen, die die Synchronität der Funkteilnehmer ermöglichen. Dies erfordert typischerweise eine koordinierende Komponente oder eine Netzinfrastruktur, aus der sich eine Zeitbasis

ableiten lässt.

## C. Begriffsklärung – Datenpaket

In der Nomenklatur des ISO/OSI-Referenzmodells werden Datenstrukturen allgemeine Begriffe zugeordnet und je nach Blickwinkel innerhalb des Schichtenmodells verwendet. Aus Sicht von Schicht  $N + 1$  wird eine Datenstruktur – eine Protocol Data Unit (PDU) – eben dieser Schicht  $N + 1$  an eine unterliegende Schicht  $N$  übergeben. Schicht  $N$  übernimmt die PDU( $N + 1$ ) als Datenstruktur und bildet diese als ihre Service Data Unit (SDU) der Schicht  $N$  ab. Im weiteren modifiziert und erweitert Schicht  $N$  die erhaltene SDU( $N$ ) um Steuerungsinformationen ihrer Schicht und führt die resultierende PDU( $N$ ) ihrerseits Schicht  $N - 1$  zu. Diese so erhaltene PDU( $N$ ) wird als SDU( $N - 1$ ) interpretiert und weiterverarbeitet. In der Netzwerktechnik haben sich für die PDU bestimmter Schichten feste Begriffe etabliert. So wird bei Ethernet die PDU der Sicherungsschicht als *Datenframe* bezeichnet, die der Netzwerkschicht als *Datenpaket* und die der Transportschicht als *Datensegment* [125].

Da für drahtgebundene industrielle Kommunikationssysteme viele ISO/OSI-Schichten ungenutzt bleiben, gibt es für die verwendeten Datenstrukturen folglich keine derart feingranulare Unterscheidung. Häufig ist bei legacy Bussystemen entweder von *Datenpaket* oder von *Telegramm* die Rede, bei Industrial-Ethernet auch von (Ethernet)-*Frame* – offensichtlich folgt dieser Gebrauch nicht der Nomenklatur der Netzwerktechnik. In Referenz zur Netzwerktechnik ordnen sich all diese Begriffe zumeist der PDU auf Sicherungsschicht oder der Netzwerk- und Vermittlungsschicht zu, also dem Begriff Datenpaket. Im Zuge dieser Arbeit wird entsprechend der Begriff *Datenpaket* verwendet, da hiermit zugleich der Vermittlung über und der Anbindung für verschiedenartige Kommunikationssysteme Rechnung getragen wird.

## D. Latenzberechnung für drahtgebundene Übertragung

Die resultierende Übertragungslatenz für ein Industrial-Ethernet-System des Typs 3 wird durch drei wesentliche Faktoren bestimmt: die Bandbreite  $BW$  des Übertragungsmediums, die Leitungslänge  $Dist$  der drahtgebundenen Verbindungen und die Durchlaufzeiten  $D_{Dev}$  in den Geräten. Abbildung 5.7 veranschaulicht die Latenz der Datenübertragung in Form eines Weg-Zeit-Diagramms, auf Basis dessen die nachfolgende Analyse erfolgt.

### Übertragungsrate

Die gängigen Industrial-Ethernet-Systeme basieren auf Fast Ethernet, das eine Bruttoübertragungsrate von  $R_{FE} = 100 \text{ Mbps}$  bereitstellt. Bei gegebener Paketgröße  $S$  eines Ethernet-Pakets kann die resultierende Verzögerung  $D_{BW}(S)$  berechnet werden. Übersteigt die Summe der Nutzdaten  $S_{app}$  – Soll- oder Istwerte – aller Feldgeräte die Maximum Transfer Unit (MTU) eines Ethernet-Pakets, werden wie beispielsweise bei sercos III die Nutzdaten auf mehrere Ethernet-Pakete verteilt. Damit kann die Paketgröße  $S$  als eine aus mehreren aufeinanderfolgenden Ethernet-Paketen bestehende virtuelle Paketgröße modelliert werden, mit deren Hilfe auf die Übertragungsverzögerung geschlossen werden kann. Zu diesem Zweck wird der Abstand zweier Ethernet-Pakete durch den Inter-Frame-Gap  $Eth_{IFG}$  berücksichtigt. Ferner kann  $S$  mit den weiteren, in Tabelle D.1 definierten Parametern bestimmt werden

$$\begin{aligned} S(N, s_{app}) &= k \cdot (Eth_H + IE_H) + (k - 1) \cdot Eth_{IFG} + N \cdot s_{App} \\ &= k \cdot (Eth_H + IE_H + Eth_{IFG}) - Eth_{IFG} + N \cdot s_{App}. \end{aligned} \quad (D.1)$$

Der Parameter  $k \in [1, K]$  beschreibt die Anzahl der Ethernet-Pakete, die für die Übertragung aller Nutzdaten benötigt werden. Dieser Parameter  $k$  ist abhängig von der Anzahl  $N$  der Feldgeräte und deren Nutzdatengröße  $s_{App}$  pro Feldgerät. Er kann über folgende Ungleichung

$$(k - 1) < \frac{N \cdot s_{App}}{MTU_{IE}} \leq k, \quad k \in [1, K] \quad (D.2)$$

beschrieben und dementsprechend ermittelt werden

$$k = \left\lceil \frac{N \cdot s_{App}}{MTU_{IE}} \right\rceil. \quad (D.3)$$

Eine obere Grenze für  $K$  ist theoretisch nicht erforderlich, in der Praxis hingegen üblich. Im Falle von sercos III gilt beispielsweise  $K = 4$ , was in Design-Entscheidungen des Protokolls gründet, das wiederum darauf ausgelegt ist, eine möglichst breite Palette praxisrelevanter Anwendungsfälle bedienen zu können. Unter Berücksichtigung der Übertragungsrate  $R_{FE}$  kann schließlich die resultierende Übertragungsverzögerung  $D_{BW}(S)$  bestimmt werden

$$D_{BW}(S) = D_{BW}(N, s_{App}) = \frac{S(N, s_{App})}{R_{FE}}. \quad (D.4)$$



Tabelle D.1.: Parameter für Datenübertragung und Latenzmodellierung eines Industrial-Ethernet-basierten Systems vom Typ 3.

Akronym	Beschreibung
$Eth_{Pre}$	Bitübertragungsschicht von Ethernet (inkl. SFD, 8 Bytes)
$Eth_{DLL}$	Sicherungsschicht von Ethernet (inkl. FCS, 18 Bytes)
$Eth_H$	Header von Ethernet, $Eth_h = Eth_{Pre} + Eth_{DLL}$
$Eth_{IFG}$	Ethernet Inter-Frame-Gap (in Byte)
$MTU_{Eth}$	Maximum Transfer Unit von Ethernet (1500 Bytes)
$IE_H$	Header von Industrial-Ethernet-System (in Byte)
$MTU_{IE}$	Korrigierte MTU, $MTU_{IE} = MTU_{Eth} - IE_h$ (in Byte)
$s_{App}$	Nutzdaten für ein / von einem Feldgerät (in Byte)
$S_{App}$	Summe der Nutzdaten für alle / von allen Feldgeräten (in Byte)
$S$	(virtuelle) Paketgröße auf dem Übertragungsmedium (in Byte)
$k$	Anzahl der Ethernet-Pakete für Übertragung aller Nutzdaten
$R_{FE}$	Bruttodatenrate von Fast Ethernet (100 Mbps)
$N$	Anzahl Feldgeräte in Linie
$L(n)$	Leitungslänge von Steuerung zu $n$ -tem Feldgerät der Linie
$D_{BW}(\cdot)$	Verzögerung durch Bandbreite des Übertragungsmediums
$D_{Dist}(\cdot)$	Verzögerung durch Ausbreitung auf Übertragungsleitung
$D_{Dev}$	Verzögerung durch Weiterleitung in Feldgerät

### Leitungslänge

Für die in diesen Betrachtungen relevante Linientopologie beschreibt die Leitungslänge  $L(n)$  die Länge der Leitung von der Steuerung bis zum  $n$ -ten Feldgerät der Linie. Zusammen mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  eines elektrischen Signals auf dem Übertragungsmedium kann so die Ausbreitungsverzögerung  $D_{Dist}(n)$  zu Feldgerät  $n$  berechnet werden

$$D_{Dist}(n) = \frac{L(n)}{c}. \quad (D.5)$$

Für Fast Ethernet mit seiner Kupfer-basierten Leitung ergibt sich eine Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c \approx 2 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

### Gerätedurchlauf

Wie in Abschnitt 3.2.1.2 beschrieben, leiten Industrial-Ethernet-basierte Feldgeräte vom Typ 3 Ethernet-Pakete ohne Zwischenspeicherung an benachbarte Feldgeräte weiter. Dieser Gerätedurchlauf verursacht eine Durchlaufverzögerung  $D_{Dev}$  pro Feldgerät, die für gängige Industrial-Ethernet-Systeme vom Typ 3 in der Größenordnung weniger Nanosekunden liegt.

### Resultierende Übertragungslatenz

Damit ergibt sich für die Sollwert-Übertragung eine resultierende Übertragungsverzögerung

## Anhang D | LATENZBERECHNUNG FÜR DRAHTGEBUNDENE ÜBERTRAGUNG

$D_{c,N}$  für das letzte Feldgerät  $N$  einer Linientopologie

$$D_{c,N} = (N - 1) \cdot D_{Dev} + D_{Dist}(N) + D_{BW}(N, s_{App}). \quad (\text{D.6})$$

Hierbei enthält Gleichung (D.6) die Vereinfachung, dass die Nutzdaten  $s_{App}$  pro Feldgerät gleich groß sind, was eine valide Annahme für industrielle Anwendungen der Feldebene darstellt.

## E. Abbildungsverzeichnis

1.1.	Schematische Ausführung einer industriellen Anwendung auf Feldebene . . . .	3
2.1.	Automatisierungspyramide . . . . .	11
2.2.	Technologien auf Feldebene der Fertigungsautomatisierung . . . . .	12
2.3.	Antriebsprofile nach IEC-61800-7 . . . . .	15
2.4.	Beispiel – Profilstruktur für SERCOS-Geräte . . . . .	16
2.5.	Schematisches Systemmodell mit Anforderungsprofil . . . . .	17
2.6.	Zeitliche Kenngrößen industrieller Kommunikationssysteme . . . . .	18
2.7.	Beispiel – Jitter bei einer Druckmaschine . . . . .	19
2.8.	Anforderungsprofil – Fertigungszelle und Sensor-Aktor-Netzwerk . . . . .	21
2.9.	Anforderungsprofil – Motion-Control . . . . .	23
3.1.	Protokollstapel von sercos III . . . . .	31
3.2.	Zeitdiagramm für sercos III . . . . .	32
3.3.	Medienzugriffsschema von WISA . . . . .	44
5.1.	Grundlegende Kommunikationsprinzipien . . . . .	55
5.2.	Schichtenmodell der Feldebene . . . . .	56
5.3.	Beispiel – Producer-Consumer-Modell von sercos III . . . . .	57
5.4.	Topologien der Feldebene . . . . .	59
5.5.	Zyklische Kommunikation . . . . .	60
5.6.	Topologien zur Latenzmodellierung . . . . .	61
5.7.	Latenzmodellierung der drahtgebundenen Übertragung . . . . .	61
5.8.	Funkbasierte Medienzugriffsverfahren . . . . .	63
5.9.	Beispiel – Medienzugriffsverfahrens nach IEEE 802.11n . . . . .	65
5.10.	Struktur von Datenpaketen . . . . .	66
5.11.	Schichtenmodell der Koppelkomponente . . . . .	67
5.12.	Modelle zur Synchronisation . . . . .	68
5.13.	Synchronisation und Rechtzeitigkeit . . . . .	71
5.14.	Modell für Übertragungsfehler auf der Übertragungsstrecke . . . . .	73
6.1.	Aufbau des Kapitels zur Systemarchitektur . . . . .	76
6.2.	Topologien für hybride industrielle Kommunikationssysteme . . . . .	79
6.3.	Anbindungskonzepte für hybride industrielle Kommunikationssysteme . . . .	82
6.4.	Koppelkomponente des hybriden industriellen Kommunikationssystems . . . .	85
6.5.	Systemarchitektur des hybriden industriellen Kommunikationssystems . . . .	86
7.1.	Gesamtdatenratenbedarf industrieller Anwendungen . . . . .	90
7.2.	Schichtenmodell der Feldebene mit der IEEE-802.xx-Familie . . . . .	92
7.3.	Übertragungslatenz mit IEEE 802.11n . . . . .	95
7.4.	Verbesserungspotenziale mit IEEE 802.11n . . . . .	97
7.5.	Effizienz der Datenübertragung mit IEEE 802.11n . . . . .	98

7.6.	Abhängige Größen im hybriden industriellen Kommunikationssystem . . . . .	101
7.7.	Schichtenmodell der Feldebene mit Mehrträgersystem . . . . .	104
7.8.	Zeit-Frequenz-Schema eines Mehrträgersystems . . . . .	106
7.9.	Paketwiederholungen für Mehrträgersystem . . . . .	111
7.10.	Logische Geräteverbindungen über Koppelkomponente . . . . .	113
7.11.	Industrial-Ethernet-Brücke mit sercos III . . . . .	115
7.12.	Industrial-Ethernet-Brücke im Schichtenmodell der Feldebene . . . . .	116
7.13.	Inbetriebnahme der Industrial-Ethernet-Brücke . . . . .	119
7.14.	Synchronisationsverfahren in der Netzwerkdomeäne . . . . .	121
7.15.	Synchronisationsverfahren bei Industrial Ethernet & Funksystemen . . . . .	123
7.16.	Verfahren I zur groben Synchronisation . . . . .	125
7.17.	Messergebnisse im Einschaltvorgang für Synchronisationsverfahren I . . . . .	127
7.18.	Gegenüberstellung von Synchronisationsverfahren I & II . . . . .	128
7.19.	Messergebnisse im stationären Zustand für Synchronisationsverfahren I & II . . . . .	129
7.20.	Optimierungsstrategien zur Datenpaketformung . . . . .	131
8.1.	Feinstruktur der Industrial-Ethernet-Brücke . . . . .	140
9.1.	Anwendungsbeispiel einer Rundtaktmaschine. . . . .	145
9.2.	Demonstratorsystem für Anwendungsbeispiel . . . . .	147
9.3.	Messergebnisse für Übertragungslatenz im Demonstratorsystem . . . . .	152
9.4.	Messergebnisse für Zwischenankunftszeit im Demonstratorsystem . . . . .	153
10.1.	Anwendungsbeispiel einer Verpackungsmaschine. . . . .	157
10.2.	Strategie der Simulationsstudie und ihre Batches . . . . .	160
10.3.	Simulationsmodell der Istwertübertragung . . . . .	162
10.4.	Simulationsergebnisse für Übertragungslatenz im $N'$ -Batch . . . . .	164
10.5.	Simulationsergebnisse für Paketwiederholungen im $N'$ -Batch . . . . .	165
10.6.	Simulationsergebnisse für Paketverlustrate im $N'$ -Batch . . . . .	166
10.7.	Simulationsergebnisse für Paketverlustrate im $OPT$ -Batch . . . . .	167
10.8.	Simulationsergebnisse für Übertragungslatenz im $OPT$ -Batch . . . . .	168
10.9.	Simulationsergebnisse für Paketverlustrate im $MAC$ -Batch . . . . .	170
10.10.	Simulationsergebnisse für Übertragungslatenz im $MAC$ -Batch . . . . .	171
10.11.	Zeitschlitzdauern für Access-Control-Methode im $MAC$ -Batch . . . . .	172
A.1.	Serviceorientiertes Schichtenmodell . . . . .	ii
B.1.	Multiplexverfahren zur Nutzertrennung . . . . .	iv
B.2.	Betriebsarten funkbasierter Kommunikationsnetze . . . . .	v

## F. Tabellenverzeichnis

2.1.	Kenngrößen von Anforderungsprofilen . . . . .	20
2.2.	Anforderungsprofile unter Mobilitätsanforderungen . . . . .	24
2.3.	Randbedingungen durch funktionale Sicherheit . . . . .	26
3.1.	Klassifizierung von Industrial-Ethernet-Systemen . . . . .	33
4.1.	Bewertung des Schichtenmodells für industrielle Anwendungen . . . . .	50
5.1.	Messergebnisse von Bündelfehlern für IEEE-802.11n-Funkkanal . . . . .	74
6.1.	Ausführungsformen physikalischer Einzelpunktverbindungen . . . . .	78
7.1.	Kenngrößen der IEEE-802.xx-Familie . . . . .	93
7.2.	Bewertung der Systemkapazität der IEEE-802.xx-Familie . . . . .	94
7.3.	Annahmen zur Verwendung von IEEE 802.11n . . . . .	96
7.4.	Bewertung der Echtzeitfähigkeit von IEEE 802.11n . . . . .	99
7.5.	Parameter für echtzeitfähige Grundstruktur . . . . .	102
7.6.	Systemparameter für Mehrträgersystem . . . . .	108
7.7.	Beispielparametrierung des Mehrträgersystems . . . . .	109
7.8.	Kenngrößen von sercos III . . . . .	112
7.9.	Bewertung des Optimierungspotenzials . . . . .	135
8.1.	Gegenüberstellung von Anforderungen und Architekturkonzepten . . . . .	138
8.2.	Bewertung des hybriden industriellen Kommunikationssystems . . . . .	141
9.1.	Anforderungen einer Rundtaktmaschine . . . . .	146
9.2.	Messgrößen für Fallbeispiel der Rundtaktmaschine . . . . .	150
9.3.	Messergebnisse und ihre Statistiken im Demonstratorsystem . . . . .	154
9.4.	Messergebnisse zur Echtzeitfähigkeit im Demonstratorsystem . . . . .	155
10.1.	Anforderungen einer Verpackungsmaschine . . . . .	158
10.2.	Simulationsergebnisse und ihre Statistiken . . . . .	173
D.1.	Parameter zur Latenzmodellierung von Industrial-Ethernet-Systemen . . . . .	ix

## G. Akronyme

**3GPP** 3rd Generation Partnership Project. 3, 27, 39, 48

**5G-ACIA** 5G Alliance for Connected Industries and Automation. 27, 77

**AC** Access Category – Verkehrsklasse. 64, 65, 74

**ACK** Acknowledgement. 35, 65, 66, 101, 133

**AGC** Automatic Gain Control. 104

**AP** Access Point. 35, 95, 149, 151

**AS-i** Actuator-Sensor-Interface – Feldbusstandard. 45

**AT** Answer Telegram – Telegrammtyp von sercos III. 33

**BACnet** Building Automation and Control Networks. 9

**BEC** Rückwärtsfehlerkorrektur. 73, 74

**BMBF** Bundesministeriums für Bildung und Forschung. 48

**BMC** Best Master Clock. 121

**BPSK** Binary Phase Shift Keying. 93, 100, 109

**BR** Basic-Rate – Bluetooth. 36, 93

**CAN** Controller Area Network. 56

**CAP** Contention Access Period. 37

**CDMA** Code Division Multiplex Access. 103

**CFP** Contention Free Period. 37

**CIP** Common Industrial Protocol. 26, 32

**CPU** Central Processing Unit. 151

**CQI** Channel Quality Indicator. 65, 73

**CSMA** Carrier Sense Multiple Access. 27, 35

**CSMA/CA** Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance. 35, 37, 41, 67, 94, 109, 123, 151, 159, 161, 163–165, 167, 169, 170, 174

**CSMA/CD** Carrier Sense Multiple Access Collision Detection. 31, 32, 151

**CTS** Clear-to-Send. 35

**DCF** Distributed Coordination Function. 35, 36, 94, 101

**DCS** Dynamic Channel Selection. 38

**DECT** Digital Enhanced Cordless Telecommunications. 38, 39

**DES** Discrete Event Simulation. 159

**DIN** Deutsche Industrienorm. 9

**DL** Downlink. 44

**DPSK** Differential Phase Shift Keying. 93

**DSSS** Direct Sequence Spread Spectrum. 37, 93

**EDCA** Enhanced Distributed Channel Access. 36, 41, 64, 65, 94, 95, 97–99, 101

**EDDL** Electronic Device Description Language – Gerätebeschreibungssprache. 14

**EDF** Earliest Deadline First. 43

**EDGE** Enhanced Data Rates for GSM Evolution. 39

**EDR** Enhanced-Data-Rate – Bluetooth. 36, 93

**EDS** Electronic Datasheet. 14

**EMV** Elektromagnetische Verträglichkeit. 112

**EN** European Norm. 27

**EPC** Evolved Packet Core. 40

**ERP** Enterprise Resource Planning. 11

**ETSI** European Telecommunications Standards Institute. 21, 24, 27, 38, 39

**FCC** Federal Communications Commission. 39

**FDD** Frequency Division Duplex. iv, 44, 45

**FDI** Field Device Integration – Standard für Gerätebeschreibung. 14

**FDMA** Frequency Division Multiplex Access. 38, 45, 103, 104

**FDT** Field Device Tool – Gerätebeschreibungssprache. 14

**FEC** Vorwärtsfehlerkorrektur. 73, 74

**FFT** Fast Fourier Transform. 109

**FH** Frequency Hopping. 44

- FHSS** Frequency Hopping Spread Spectrum. 36
- FM** Funk-Master. 85, 114
- FS** Funk-Slave. 85, 87, 114
- FSP** Function Specific Profile – Teilmenge des SERCOS-Profiles. 16
- GCC** GNU Compiler Collection. 148
- GDP** Generic Device Profile – Teilmenge des SERCOS-Profiles. 16
- GFSK** Gaussian Frequency Shift Keying. 93
- GMA** VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik. 77
- gNB** Next generation eNodeB – 5G Basisstation. 40
- GPRS** General Packet Radio Service. 39
- GSD** Generic Station Description. 14
- GSDML** Generic Station Description Markup Language. 14
- GSM** Global System for Mobile Communication. iv, xv, 39, 42, 44
- GTS** Guaranteed Time Slots. 37, 38
- HART** Highway Addressable Remote Transducer. 10
- HCCA** Hybrid Controlled Channel Access. 36, 41, 94, 99
- HCF** Hybrid Coordination Function. 36
- HSPA** High Speed Packet Access. 39
- HSR** High-availability Seamless Redundancy. 42, 43
- IEC** International Electrotechnical Commission. 10, 11, 14, 15, 22, 25, 26, 30–32, 42, 45
- IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers. iii, xi, xiii, 3, 9, 10, 27, 30–32, 34–38, 41–47, 56, 61, 64, 65, 67, 74, 75, 89, 92–101, 104, 108–110, 113, 120, 123, 136, 137, 140, 144, 148, 149, 151, 154, 156, 159, 163, 167, 175, 177, 179
- IETF** Internet Engineering Task Force. 17
- IIR** Infinite Impulse Response. 129
- IoT** Internet of Things. 36, 48, 179
- IP** International Protection – Standard für Schutzklasse von Geräten. 9
- IR-UWB** Impulse Radio Ultra-Wideband. 22, 24, 45, 46
- IRT** Isochronous Real-Time – Profinet IRT Profil. xvi, 32



- ISA** International Society of Automation. 10, 37
- ISM** Industrial, Scientific and Medical – Lizenzfreies Frequenzband. 3, 9, 27–29, 34, 36, 37, 39, 42, 44–47, 77, 80, 89, 100, 130, 136, 150, 156, 175, 179
- ISO** International Organization for Standardization. 26
- ISO/OSI** International Organization for Standardization / Open Systems Interconnect. vii, 31, 34, 43, 46, 50, 54, 58, 61, 78, 85
- ITU** International Telecommunication Union. 17
- KNX** Feldbus der Gebäudeautomation. 9
- LAN** Local Area Network. 39
- LLDN** Low Latency Deterministic Network. 38
- LQI** Link Quality Indicator. 65, 73
- LTE** Long Term Evolution. iii, iv, 3, 39–41, 48, 102, 104, 108–110
- LTS** Long Term Support. 148
- M2M** Machine-to-Machine. 179
- MAC** Medium Access Control. 31, 35, 36, 38, 74, 104
- MDT** Master Data Telegram – Telegrammtyp von sercos III. 33
- MES** Manufacturing Execution System. 11
- MII** Media Independent Interface. 32
- MIMO** Multiple-Input Multiple-Output. xvii, 35, 90, 93
- MTU** Maximum Transfer Unit. viii, ix
- MU-MIMO** Multi-User MIMO. 35, 65, 80
- NAMUR** Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik für Prozessindustrie. 9
- NC** Numerical Control. 2, 12, 13
- NTP** Network Time Protocol. 120, 121, 123
- OFDM** Orthogonal Frequency Division Multiplex. 39, 91–93, 104, 106, 108, 109
- OFDMA** Orthogonal Frequency Division Multiplex Access. 35, 40–42, 65, 80, 104, 108
- OPC-UA** Open Platform Communications Unified Architecture. 14
- OSI** Open Systems Interconnect. 35, 36, 43, 55

- P** Proportional (Regler). 134
- P2MP** Point-To-Multi-Point – Mehrpunktverbindung. 79
- P2P** Point-To-Point – Einzelpunktverbindung. 78
- PAN** Personal Area Network. 37, 38
- PCF** Point Coordination Function. 35, 36, 41, 94
- PCI** Peripheral Component Interconnect. 147, 149
- PDU** Protocol Data Unit. vii
- PI** Proportional-Integral (Regler). 134
- PID** Proportional-Integral-Derivative (Regler). 134
- PLL** Phase Locked Loop. 123, 128, 129, 134
- PRP** Parallel Redundancy Protocol. 42
- PTP** Precision Timing Protocol. 32, 41, 120–123
- QAM** Quadrature Amplitude Modulation. 93
- QoS** Quality of Service. 16, 17, 26, 31, 36, 40, 60, 86
- QPSK** Quadrature Phase Shift Keying. 93, 100, 109
- RT** Real-Time – sercos III RT-Channel oder Profinet RT Profil. xviii, 31–33
- RTS** Request-to-Send. 35
- SAP** Service Access Point. 54–56, 59–61, 73–75, 77, 89, 104, 115, 136, 138, 139, 161
- SAW** Akustische Oberflächenwellen. iv
- SCADA** Supervisory Control and Data Acquisition. 11
- SDDML** SERCOS Device Description Markup Language. 14
- SDIO** Secure Digital Input Output. 148, 151
- SDU** Service Data Unit. vii
- SIG** (Bluetooth) Special Interest Group. 36
- SIL** Safety Integrity Level. 25, 26
- SK** Starter Kit – AM3358 Starter Kit von Texas Instruments. 148–155
- SPS** Speicherprogrammierbare Steuerung. 12, 13
- TCP/IP** Transmission Control Protocol/Internet Protocol. 31, 33, 74, 83

- TDD** Time Division Duplex. 36
- TDMA** Time Division Multiple Access. v, 38, 39, 41, 44–46, 63, 64, 67, 103
- TR** Technical Report. 21, 24
- TSCH** Time Slotted Channel Hopping. 38
- TSF** Time Synchronization Function. 123
- TSN** Time Sensitive Networking. 34, 48
- TTI** Time Transmission Interval. 109
- TXOP** Transmit Opportunities. 36
- UCC** Unified Control Channel. 31–33, 112
- UDP** User Datagram Protocol. 31
- UE** User Equipment – 5G Endgerät. 40
- UL** Uplink. 44
- UMTS** Universal Mobile Telecommunications System. iii, iv, 39, 103
- URLLC** Ultra-Reliable Low-Latency Communication. 39, 40, 48
- USP** Unique Selling Proposition. 10
- UX** User Experience. 4
- VDE** Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik. xvi, 21, 77
- VDI** Verein Deutscher Ingenieure. xvi, 21, 77
- VLAN** Virtual Local Area Network. 32
- VTP** Virtual Token Passing. 41
- WIA-FA** Wireless Networks for Industrial Automation - Factory Automation. 10
- WIA-PA** Wireless Networks for Industrial Automation - Process Automation. 10, 37
- WiRIA** Wireless Regulierung in der Industrieautomation. 27, 77
- WISA** Wireless Interface for Sensors and Actuators. xi, 22, 24, 44, 45, 47
- WLAN** Wireless Local Area Network. iii, iv, 27, 34–36, 41–43, 75, 89, 108, 123, 150
- WPAN** Wireless Personal Area Network. 34, 89
- WSAN** Wireless Sensor/Actuator Network. 22, 24, 45
- WSN** Wireless Sensor Networks. 1, 37
- ZVEI** Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V.. 27, 77

## H. Literaturverzeichnis

- [1] T. Sauter, S. Soucek, W. Kastner, and D. Dietrich. The Evolution of Factory and Building Automation. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 5(3):35–48, September 2011.
- [2] IEC 61158-1:2019. Industrial communication networks – Fieldbus specifications – Part 1: Overview and guidance for the IEC 61158 and IEC 61784 series. Standard, International Electrotechnical Commission, 2019.
- [3] IEC 61784-1:2019. Industrial communication networks – Profiles - Part 1: Fieldbus profiles. Standard, International Electrotechnical Commission, 2019.
- [4] R. Zurawski. *Industrial Communication Technology Handbook*. CRC Press, 2nd edition, December 2017.
- [5] Sercos Working Group TWG Communication. sercos III – Communication Specification. Specification V1.3.1, Sercos International e.V., 2013.
- [6] M. Griesenbruch. Markstudie Industrielle Kommunikation – Feldbus / Ethernet / Wireless. Technical report, FH Südwestfalen, 2008.
- [7] K. Juschkat. Industrielle Netzwerke – Industrial-Ethernet-Netzwerke überholen Feldbusse. Online, Vogel Communications Group, 2018, September 2020 (retrieved). [www.elektrotechnik.vogel.de/industrial-ethernet-netzwerke-ueberholen-feldbusse-a-695792](http://www.elektrotechnik.vogel.de/industrial-ethernet-netzwerke-ueberholen-feldbusse-a-695792).
- [8] G. Kucera. Marktanteile industrieller Netzwerke 2020 – aus der Sicht von HMS. Online, Vogel Communications Group, 2020, September 2020 (retrieved). [www.elektronikpraxis.vogel.de/marktanteile-industrieller-netzwerke-2020-aus-der-sicht-von-hms-a-940919](http://www.elektronikpraxis.vogel.de/marktanteile-industrieller-netzwerke-2020-aus-der-sicht-von-hms-a-940919).
- [9] A. Flammini, D. Marioli, E. Sisinni, and A. Taroni. Design and Implementation of a Wireless Fieldbus for Plastic Machineries. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(3):747–755, March 2009.
- [10] K. Kunert, E. Uhlemann, and M. Jonsson. Enhancing reliability in IEEE 802.11 based real-time networks through transport layer retransmissions. In *Proc. Int Industrial Embedded Systems (SIES) Symp*, pages 146–155, July 2010.
- [11] A. Willig. Polling-Based MAC Protocols for Improving Real-Time Performance in a Wireless PROFIBUS. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50(4):806–817, August 2003.
- [12] L. Seno. *Real-Time Networks and Protocols for Industrial Automation*. Dissertation, Italian National Council of Research, Department of Information Engineering, University of Padova, 2011.

- [13] ZVEI. Coexistence of Wireless Systems in Automation Technology. Technical report, ZVEI - German Electrical and Electronic Manufacturers' Association, April 2009.
- [14] DIN 276-4:2009-08. DIN Norm: Kosten im Bauwesen - Teil 4: Ingenieurbau. Norm, Deutsches Institut für Normung, 2009.
- [15] ISO 20653:2013-02. Straßenfahrzeuge - Schutzarten (IP-Code) - Schutz gegen fremde Objekte, Wasser und Kontakt - Elektrische Ausrüstungen. Norm, International Organization for Standardization, 2013.
- [16] DIN EN ISO 16484-5:2017-12. Systeme der Gebäudeautomation - Teil 5: Datenkommunikationsprotokoll (ISO 16484-5:2017); Englische Fassung EN ISO 16484-5:2017. Norm DIN EN ISO 1648, Deutsches Institut für Normung, 2017.
- [17] ISO/IEC 14543-3-1:2006-09. Informationstechnik - Architektur für Heim-Elektronik-Systeme (HES) - Teil 3-1: Kommunikationsschichten - Anwendungsschichten für HES Klasse 1. Standard, International Organization for Standardization, 2006.
- [18] IEEE 802.15.4-2020. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks – IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)). Standard, IEEE Computer Society, 2020.
- [19] S. Petersen and S. Carlsen. WirelessHART Versus ISA100.11a: The Format War Hits the Factory Floor. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 5(4):23–34, December 2011.
- [20] IEEE 802.15.4a-2007. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs): Amendment 1: Add Alternate PHYs. Standard, IEEE Standards Association, 2007.
- [21] IEC 62591:2016. Industrial networks – Wireless communication network and communication profiles – WirelessHART . Standard, International Electrotechnical Commission, 2016.
- [22] ANSI/ISA 100.11a:2011. Wireless systems for industrial automation: Process control and related applications. Standard, International Standards on Auditing, 2011.
- [23] IEC 62734:2014. Industrial networks – Wireless communication network and communication profiles – ISA 100.11a. Standard, International Electrotechnical Commission, 2014.
- [24] IEC 62601:2015. Industrial networks – Wireless communication network and communication profiles – WIA-PA. Standard, International Electrotechnical Commission, 2015.
- [25] S. Hesse. *Fertigungsautomatisierung: Automatisierungsmittel, Gestaltung und Funktion*. Vieweg Verlag, 1st edition, December 2000.
- [26] IEC 62948:2017. Industrial networks – Wireless communication network and communication profiles – WIA-FA. Standard, International Electrotechnical Commission, 2017.
- [27] T. Sauter. The Three Generations of Field-Level Networks - Evolution and Compatibility Issues. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(11):3585–3595, November 2010.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [28] R. Langmann. *Taschenbuch der Automatisierung*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 3rd edition, 2017.
- [29] IEC 62453-1:2016. Field device tool (FDT) interface specification - Part 1: Overview and guidance. Standard, International Electrotechnical Commission, 2016.
- [30] IEC 61804-3:2015. Function Blocks (FB) for process control and Electronic Device Description Language (EDDL) - Part 3: EDDL syntax and semantics. Standard, International Electrotechnical Commission, 2015.
- [31] OPC-UA:2017. OPC Unified Architecture Specification Part 1: Overview and Concepts. Specification, OPC Foundation, 2017.
- [32] F. Klasen, V. Oestreich, and M. Volz. *Industrielle Kommunikation mit Felddbus und Ethernet*. VDE-Verlag, 2010.
- [33] IEC 61800-7-1:2015. Adjustable speed electrical power drive systems - Part 7-1: Generic interface and use of profiles for power drive systems - Interface definition. Standard, International Electrotechnical Commission, 2015.
- [34] IEC 61800-7-2:2006. Adjustable speed electrical power drive systems - Part 7-2: Generic interface and use of profiles for power drive systems - Profile specifications. Standard, International Electrotechnical Commission, 2006.
- [35] IEC 61800-7-201:2015. Adjustable speed electrical power drive systems - Part 7-201: Generic interface and use of profiles for power drive systems - Profile type 1 specification. Standard, International Electrotechnical Commission, 2015.
- [36] IEC 61800-7-204:2015. Adjustable speed electrical power drive systems - Part 7-204: Generic interface and use of profiles for power drive systems - Profile type 4 specification. Standard, International Electrotechnical Commission, 2015.
- [37] IEC 61800-7-304:2015. Adjustable speed electrical power drive systems - Part 7-304: Generic interface and use of profiles for power drive systems - Mapping of profile type 4 to network technologies. Standard, International Electrotechnical Commission, 2015.
- [38] ETSI TR 102 889-2 V1.1.1 (2011-08). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); System Reference Document; Short Range Devices (SRD); Part 2: Technical characteristics for SRD equipment for wireless industrial applications using technologies different from Ultra-Wide Band (UWB). Technical report, European Telecommunications Standards Institute, DTR/ERM-TG28-0429-2, August 2011.
- [39] G. Scheible, D. Dzung, J. Endresen, and J.-E. Frey. Unplugged But Connected - Design and Implementation of a Truly Wireless Real-Time Sensor/Actuator Interface. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 1(2):25–34, July 2007.
- [40] M. Bauer. Herausforderungen für den Einsatz von Wireless auf der Feldebene der Fertigungsautomatisierung. In *VDI-Jahrestagung Wireless Automation*, Baden-Baden, March 2013.
- [41] VDI/VDE 2185 BLATT 1. Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik. Technical report, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, September 2007.

- [42] H.-J. Körber. *Konzeptstudie zur Implementierung eines modularen echtzeitfähigen drahtlosen Sensor-/Aktornetzes für die Fertigungsautomatisierung*. Dissertation, Helmut Schmidt Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg, 2007.
- [43] J. Hund. *Entwurf eines robusten drahtlosen Kommunikationssystems für die industrielle Automatisierung unter harten Echtzeitbedingungen auf Basis von Ultrawideband-Impulsfunk*. Dissertation, Fakultät für Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2012.
- [44] IEC 62026-2:2008/AMD1:2019. Amendment 1 – Low-voltage switchgear and controlgear – Controller-device interfaces (CDIs) – Part 2: Actuator sensor interface (AS-i). Standard, International Electrotechnical Commission, 2019.
- [45] A. Frotzsch, U. Wetzker, M. Bauer, M. Rentschler, M. Beyer, S. Elspass, and H. Klessig. Requirements and current solutions of wireless communication in industrial automation. In *Enablers for Ultra-Low End-to-End Latency in 5G Wireless Communications Systems, 2014 1st IEEE International Workshop on*, pages 67–72, June 2014.
- [46] H.-J. Körber, H. Wattar, and G. Scholl. Modular Wireless Real-Time Sensor/Actuator Network for Factory Automation Applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 3(2):111–119, May 2007.
- [47] W. Stripf. Sicherheitsbezogene Bussysteme - Merkmale nach IEC 61784-3. In *DKE-Tagung zur IEC-61508*. PROFIBUS Nutzerorganisation, December 2009.
- [48] IEC 61784-3:2016. Industrial communication networks - Profiles - Part 3: Functional safety fieldbuses - General rules and profile definitions. Standard, International Electrotechnical Commission, 2016.
- [49] ISO/IEC 27000:2018. Information technology – Security techniques – Information security management systems – Overview and vocabulary. Standard, International Organization for Standardization, 2018.
- [50] VDI/VDE 2182 BLATT 1. Informationssicherheit in der industriellen Automatisierung - Allgemeines Vorgehensmodell. Technical report, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, 2011.
- [51] M. Cheminod, L. Durante, and A. Valenzano. Review of Security Issues in Industrial Networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1):277–293, February 2013.
- [52] T. S. Rappaport. Indoor Radio Communications for Factories of the Future. *IEEE Communications Magazine*, 27(5):15–24, May 1989.
- [53] E. Tanghe, W. Joseph, L. Verloock, L. Martens, H. Capoen, K. Van Herwegen, and W. Vantomme. The Industrial Indoor Channel: Large-Scale and Temporal Fading at 900, 2400, and 5200 MHz. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(7):2740–2751, July 2008.
- [54] L. Rauchhaupt, U. Meier, P. Neufeld, and A. Schimschar. Entwicklung von Standardtests für einheitlichen Bewertung industrieller Funklösungen (FITS). Technical report, Deutsche Forschungsgesellschaft für Automatisierung und Mikroelektronik e.V., 2012.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [55] VDI/VDE 2185 BLATT 2. Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik - Koexistenzmanagement von Funklösungen. Technical report, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, December 2009.
- [56] A. Willig, M. Kubisch, C. Hoene, and A. Wolisz. Measurements of a Wireless Link in an Industrial Environment Using an IEEE 802.11-Compliant Physical Layer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(6):1265–1282, December 2002.
- [57] ETSI EN 300 328 V2.1.1 (2016-11). Wideband transmission systems;Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using wide band modulation techniques; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU. Standard, European Telecommunications Standards Institute, REN/ERM-TG11-011, November 2016.
- [58] IEEE 802.11-2012. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information; Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific; Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Standard, IEEE Standards Association, 2012.
- [59] 3GPP TR 22.804 V2.0.0 (2018-05). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Study on Communication for Automation in Vertical Domains (Release 16). Technical report, 3GPP, May 2018.
- [60] Walter, K.-D. Die Zukunft liegt in der Koexistenz – 5G-Campusnetze versus drahtgebundene Netze. Interview, Markt & Technik, August 2020.
- [61] M. Felser and T. Sauter. The Fieldbus War: History or Short Break Between Battles? In *Factory Communication Systems (WFCS), 2002 4th IEEE International Workshop on*, pages 73–80, August 2002.
- [62] IEC 61784-2:2019. Industrial communication networks – Profiles – Part 2: Additional fieldbus profiles for real-time networks based on ISO/IEC 8802-3, . Standard, International Electrotechnical Commission, 2019.
- [63] IEEE 802.3u-1995. IEEE Standards for Local and Metropolitan Area Networks: Supplement - Media Access Control (MAC) Parameters, Physical Layer, Medium Attachment Units, and Repeater for 100Mb/s Operation, Type 100BASE-T (Clauses 21-30). Standard, IEEE Standards Association, 1995.
- [64] H. Wörn and U. Brinkschulte. *Echtzeitsysteme*, volume 1 of *eXamen-press*. Springer Verlag, 1st edition, February 2005.
- [65] IEEE 1588-2008. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. Standard, IEEE Standards Association, 2008.
- [66] IEEE 802.1Q-2018. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks. Standard, IEEE Standards Association, 2018.
- [67] IEEE 802.15.1-2005. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical



- Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs). Standard, IEEE Standards Association, 2005.
- [68] IEEE 802.11n-2009. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput. Standard, IEEE Standards Association, 2009.
  - [69] IEEE 802.11ac-2013. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz. Standard, IEEE Standards Association, 2013.
  - [70] E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi. A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21:197–216, 2019.
  - [71] IEEE 802.11e-2005. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment: Medium Access Method (MAC) Quality of Service Enhancements. Standard, IEEE Standard Association, 2005.
  - [72] H. Trsek, J. Jasperneite, and S.P. Karanam. A Simulation Case Study of the new IEEE 802.11e HCCA mechanism in Industrial Wireless Networks. In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2006 11th IEEE International Conference on*, pages 921–928, September 2006.
  - [73] R. Moraes, P. Portugal, and F. Vasques. Simulation Analysis of the IEEE 802.11e EDCA Protocol for an Industrially-Relevant Real-Time Communication Scenario. In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2006 11th IEEE International Conference on*, pages 202–209, September 2006.
  - [74] G. Cena, I.C. Bertolotti, A. Valenzano, and C. Zunino. Evaluation of Response Times in Industrial WLANs. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 3(3):191–201, August 2007.
  - [75] G. Cena, A. Valenzano, C. Zunino, and L. Seno. Evaluation of real-time communication performance in QoS-enabled infrastructure WLANs. In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2009 14th IEEE International Conference on*, pages 1–7, September 2009.
  - [76] R. Moraes, P. Portugal, F. Vasques, and J.A. Fonseca. Limitations of the IEEE 802.11e EDCA protocol when supporting real-time communication. In *Factory Communication Systems (WFCS), 2008 7th IEEE International Workshop on*, pages 119–128, May 2008.
  - [77] G. Cena, L. Seno, A. Valenzano, and C. Zunino. On the Performance of IEEE 802.11e Wireless Infrastructures for Soft-Real-Time Industrial Applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 6(3):425–437, August 2010.
  - [78] M. Bauer and G. May. Grenzen der Echtzeitfähigkeit funkbasierter industrieller Kommunikationssysteme – Ursachen und Alternativen. In *KommA 2012, 3rd Annual Colloquium - Communication in Automation*, pages 130–139, Lemgo, November 2012.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [79] Bluetooth Specification. Bluetooth Core Specification, v5.2. Specification, Core Specification Working Group, December 2019.
- [80] ZigBee Specification. ZigBee Specification, ZigBee Document 05-3474-21. Specification, ZigBee Alliance Board of Directors, August 2015.
- [81] V. C. Gungor and G. P. Hancke. Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(10):4258–4265, October 2009.
- [82] J.-D. Decotignie. Real-Time and Wireless Sensor Network: is there a possible match? In *Factory Communication Systems (WFCS), 2010 8th IEEE International Workshop on*, Nancy, France, May 2010.
- [83] IEEE 802.15.4e-2012. 802.15.4e-2012 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer. Standard, IEEE Standards Association, 2012.
- [84] K. Das and P. Havinga. Evaluation of DECT-ULE for robust communication in dense wireless sensor networks. In *2012 3rd IEEE International Conference on the Internet of Things*, pages 183–190, October 2012.
- [85] Report ITU-R M.2410-0 (11/2017). Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s). Technical report, Radiocommunication Sector of International Telecommunication Union (ITU-R), November 2017.
- [86] 3GPP TR 21.916 V0.6.0 (2020-09). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 16 Description; Summary of Rel-16 Work Items (Release 16). Technical report, 3GPP, September 2020.
- [87] 3GPP TR 21.915 V2.0.0 (2019-09). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 15 Description; Summary of Rel-15 Work Items (Release 15). Technical report, 3GPP, September 2019.
- [88] ETSI statement on 3GPP 5th Generation. Why do we need 5G? Online, European Telecommunications Standards Institute, September 2020 (retrieved). [www.etsi.org/technologies/5g](http://www.etsi.org/technologies/5g).
- [89] R. Moraes, F. Vasques, P. Portugal, and J.A. Fonseca. VTP-CSMA: A Virtual Token Passing Approach for Real-Time Communication in IEEE 802.11 Wireless Networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 3(3):215–224, August 2007.
- [90] G. Gamba, L. Seno, and S. Vitturi. Performance Indicators for Wireless Industrial Communication Networks. In *Factory Communication Systems (WFCS), 2010 8th IEEE International Workshop on*, pages 3–12, May 2010.
- [91] H. Trsek and J. Jasperneite. An isochronous medium access for real-time wireless communications in industrial automation systems - A use case for wireless clock synchronization. In *Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS), 2011 International IEEE Symposium on*, pages 81–86, September 2011.

- [92] R. Costa, P. Portugal, F. Vasques, and R. Moraes. A TDMA-based Mechanism for Real-Time Communication in IEEE 802.11e Networks. In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2010 15th IEEE International Conference on*, pages 1–9, September 2010.
- [93] H. Trsek, S. Schwalowsky, B. Czybik, and J. Jasperneite. Implementation of an advanced IEEE 802.11 WLAN AP for real-time wireless communications. In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2011 16th IEEE International Conference on*, pages 1–4, September 2011.
- [94] G. Gaderer, T. Sauter, F. Ring, and A. Nagy. A Novel, Wireless Sensor/Actuator Network for the Factory Floor. In *Sensors, 2010 IEEE*, pages 940–945. IEEE, November 2010.
- [95] G. May. Medienzugriffsverfahren für einen Echtzeit-Wireless-Feldbus. *at – Automatisierungstechnik*, 9:574–582, September 2011.
- [96] G. Gamba, F. Tramarin, and A. Willig. Retransmission Strategies for Cyclic Polling Over Wireless Channels in the Presence of Interference. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 6(3):405–415, August 2010.
- [97] G. Bruck and P. Jung. Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren, Koordinatorgerät und Kommunikationsendgerät. *Patentschrift*, DE102007063480A1, 2007.
- [98] H. Beikirch, M. Voss, and A. Fink. Redundancy approach to increase the availability and reliability of radio communication in industrial automation. In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2009 14th IEEE International Conference on*, pages 1–4, September 2009.
- [99] IEC 62439-3:2016. Industrial communication networks - High availability automation networks - Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR). Standard, International Electrotechnical Commission, 2016.
- [100] M. Rentschler and P. Laukemann. Towards a reliable parallel redundant WLAN black channel. In *Factory Communication Systems (WFCS), 2012 9th IEEE International Workshop on*, pages 255–264, May 2012.
- [101] G. Cena, S. Scanzio, and A. Valenzano. Improving Effectiveness of Seamless Redundancy in Real Industrial Wi-Fi Networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(5):2095–2107, May 2018.
- [102] L. Seno, G. Cena, S. Scanzio, A. Valenzano, and C. Zunino. Enhancing Communication Determinism in Wi-Fi Networks for Soft Real-Time Industrial Applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(2):866–876, April 2017.
- [103] K. Kunert, E. Uhlemann, and M. Jonsson. Predictable Real-Time Communications with Improved Reliability for IEEE 802.15.4 Based Industrial Networks. In *Factory Communication Systems (WFCS), 2010 8th IEEE International Workshop on*, pages 13–22, May 2010.
- [104] M. Jonsson and K. Kunert. Towards Reliable Wireless Industrial Communication With Real-Time Guarantees. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 5(4):429–442, November 2009.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [105] F. De Pellegrini, D. Miorandi, S. Vitturi, and A. Zanella. On the Use of Wireless Networks at Low Level of Factory Automation Systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2(2):129–143, May 2006.
- [106] S. Vitturi, I. Carreras, D. Miorandi, L. Schenato, and A. Sona. Experimental Evaluation of an Industrial Application Layer Protocol Over Wireless Systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 3(4):275–288, November 2007.
- [107] J. Kjellsson, A.E. Vallestad, R. Steigmann, and D. Dzung. Integration of a Wireless I/O Interface for PROFIBUS and PROFINET for Factory Automation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(10):4279–4287, October 2009.
- [108] H. Gerlach-Erhardt. Real Time Requirements in Industrial Automation. In *Wireless Factory Starter Group Meeting*. ETSI, October 2009.
- [109] IEC 61131-9:2013. Programmable controllers - Part 9: Single-drop digital communication interface for small sensors and actuators (SDCI). Standard, International Electrotechnical Commission, 2013.
- [110] G. Scholl, R. Heynicke, D. Krush, B. Kärcher, J. Ritter, P. Gaggero, and M. Rentschler. IO-Link Wireless Enhanced Sensors and Actuators for Industry 4.0 Networks. In *Proceedings Sensor 2017*, chapter A8 - Wireless Sensors II, pages 134 – 138. AMA Service GmbH, 2017.
- [111] T. Sauter, J. Jasperneite, and L. Lo Bello. Towards New Hybrid Networks for Industrial Automation. In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2009 14th IEEE International Conference on*, pages 1–8, September 2009.
- [112] M. Wollschlaeger, T. Sauter, and J. Jasperneite. The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11(1):17–27, March 2017.
- [113] G. Cena, A. Valenzano, and S. Vitturi. Hybrid Wired/Wireless Networks for Real-Time Communications. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2(1):8–20, March 2008.
- [114] L. Seno, S. Vitturi, and F. Tramarin. Tuning of IEEE 802.11 MAC for Improving Real-Time in Industrial Wireless Networks. In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2012 17th IEEE International Conference on*, pages 1–8, September 2012.
- [115] L. Seno, S. Vitturi, and F. Tramarin. Experimental Evaluation of the Service Time for Industrial Hybrid (Wired/Wireless) Networks under Non-Ideal Environmental Conditions. In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2011 16th IEEE International Conference on*, pages 1–8, September 2011.
- [116] M. Alves, E. Tovar, F. Vasques, G. Hammer, and K. Rother. Real-Time Communications over Hybrid Wired/Wireless PROFIBUS-based Networks. In *Real-Time Systems, 2002. Proceedings. 14th Euromicro Conference on*, pages 142–151, June 2002.
- [117] X. Wu and L. Xie. On the Wireless Extension of EtherCAT Networks. In *2017 IEEE 42nd Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pages 235–238, October 2017.

- [118] J. von Hoyningen-Huene, A. Mueller, S. Dietrich, and G. May. Comparison of wireless gateway concepts for industrial real-time-communication. In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2016 21st IEEE International Conference on*, pages 1–4, September 2016.
- [119] D. Deng, Y. Lin, X. Yang, J. Zhu, Y. Li, J. Luo, and K. Chen. IEEE 802.11ax: Highly Efficient WLANs for Intelligent Information Infrastructure. *IEEE Communications Magazine*, 55(12):52–59, December 2017.
- [120] L. Underberg, R. Kays, S. Dietrich, and G. Fohler. Towards hybrid wired-wireless networks in industrial applications. In *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, pages 768–773, May 2018.
- [121] S. Dietrich, G. May, J. von Hoyningen-Huene, A. Mueller, and G. Fohler. Frame Conversion Schemes for Cascaded Wired / Wireless Communication Networks of Factory Automation. *Mobile Networks and Applications*, 23(4):817–827, August 2018.
- [122] S. Dietrich, G. May, J. von Hoyningen-Huene, A. Mueller, and G. Fohler. Latency in Cascaded Wired/Wireless Communication Networks for Factory Automation. In Leandros A. Maglaras, Helge Janicke, and Kevin Jones, editors, *Industrial Networks and Intelligent Systems*, pages 50–61, Cham, 2017. Springer International Publishing.
- [123] BMBF’s Funding Program: ICT 2020 - Research for innovations. Reliable Wireless Communications in Industry. Online, Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2014, September 2020 (retrieved). [www.bmbf.de/foerderungen/22967.php](http://www.bmbf.de/foerderungen/22967.php).
- [124] BMBF Project: ParSec. Ein paralleles (Par) zuverlässiges und sicheres (Sec) Funksystem zur latenz-optimierten Fabrikautomatisierung. Online, IKT 2020 – Forschung für Innovationen, March 2020 (retrieved). [www.parsec-projekt.de](http://www.parsec-projekt.de).
- [125] A. S. Tanenbaum and D. J. Wetherall. *Computer Networks*. Prentice Hall, 5th edition, 2011.
- [126] C. E. Pereira and P. Neumann. Industrial Communication Protocols. In S. Y. Nof, editor, *Handbook of Automation*, pages 981–999. Springer Verlag, 2009.
- [127] P. Scholz. *Softwareentwicklung eingebetteter Systeme: Grundlagen, Modellierung, Qualitätssicherung*. eXamen-press. Springer Verlag, Berlin, 2005.
- [128] S. Munir, S. Lin, E. Hoque, S. M. S. Nirjon, J. A. Stankovic, and K. Whitehouse. Addressing Burstiness for Reliable Communication and Latency Bound Generation in Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN ’10*, pages 303–314, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [129] J. G. Proakis. *Digital Communications*. McGraw-Hill, 4th edition, 2001.
- [130] D. Mills, J. Martin, J. Burbank, and W. Kasch. Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification. RFC 5905, RFC Editor, June 2010.
- [131] G. Cena, I. Cibrario Bertolotti, S. Scanzio, A. Valenzano, and C. Zunino. Synchronize Your Watches: Part I: General-Purpose Solutions for Distributed Real-Time Control. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(1):18–29, March 2013.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [132] G. Cena, I. Cibrario Bertolotti, S. Scanzio, A. Valenzano, and C. Zunino. Synchronize Your Watches: Part II: Special-Purpose Solutions for Distributed Real-Time Control. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(2):27–39, June 2013.
- [133] A. Mahmood, H. Trsek, G. Gaderer, S. Schwalowsky, and N. Kero. Towards High Accuracy in IEEE 802.11 based Clock Synchronization using PTP. In *2011 International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication (ISPCS 2011)*, pages 13–18, Munich, September 2011.
- [134] T. Cooklev, J.C. Eidson, and A. Pakdaman. An Implementation of IEEE 1588 Over IEEE 802.11b for Synchronization of Wireless Local Area Network Nodes. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 56(5):1632–1639, October 2007.
- [135] Bosch Rexroth - Indradrive Cs HCS01. Electrical Drive. Datasheet, Bosch Rexroth, March 2020 (retrieved).
- [136] Bosch Rexroth - MS2N. Synchronous Servo Motor. Datasheet, Bosch Rexroth, March 2020 (retrieved).
- [137] Bosch Rexroth - SERCANS III. Industrial-Ethernet-Master. Datasheet, Bosch Rexroth, March 2020 (retrieved).
- [138] Bosch Rexroth - Indraworks. Software Engineering Tool. Datasheet, Bosch Rexroth, March 2020 (retrieved).
- [139] Texas Instruments - AM3358 Starter Kit. Development Board. Datasheet, Texas Instruments, March 2020 (retrieved).
- [140] Murata - W1271L. Radio Module Chipset. Datasheet, Murata, March 2019 (retrieved).
- [141] Texas Instruments - AM335x CPSW (Ethernet) Driver's Guide. Firmware Driver Support. Datasheet, Texas Instruments, March 2020 (retrieved).
- [142] G. Gamba, L. Seno, and S. Vitturi. Theoretical and experimental evaluation of polling times for wireless industrial networks using commercially available components. In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2010 15th IEEE International Conference on*, pages 1–8, September 2010.
- [143] A. Varga and R. Hornig. An Overview of the OMNeT++ Simulation Environment. In *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops*, Simutools '08, pages 60:1–60:10, ICST, Brussels, Belgium, Belgium, June 2008. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).
- [144] M. Bauer, G. May, and V. Jain. A Wireless Gateway Approach Enabling Industrial Real-Time Communication on the Field Level of Factory Automation. In *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2014 19th IEEE International Conference on*, pages 1–8, September 2014.
- [145] J. Cowley. *Communications and Networking - An Introduction*. Springer-Verlag London, 2nd edition, 2013.

- [146] A. Masmoudi. *Self-Interference Cancellation for Full-Duplex Wireless Communications Systems*. Dissertation, Department of Electrical & Computer Engineering, McGill University, Montréal, Canada, 2017.